БЕЗОПАСНОСТЬ ТЕХНОГЕННЫХ И ПРИРОДНЫХ СИСТЕМ

№3 2017

SAFETY OF TECHNOGENIC AND NATURAL SYSTEMS

n.3 2017

ISSN 2541-9129

DOI 10.23947/2541-9129

Сетевой электронный теоретический и научно - практический журнал

Network Electronic Journal

http://bps-journal.ru/

СОДЕРЖАНИЕ

ПРОМЫШЛЕННАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ

И. В. Богданова, И. Н. Лоскутникова, К. А. Заяшникова Исследование процесса распространения шума на основе комплексной математической модели……... 2

ПОЖАРНАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ

В. Л. Адамян, Д. А. Ульмейкин Минимизация слеживаемости и увеличение текучести огнетушащих порошков……..... 18

ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ И ЗАЩИТА ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

О. В. Дымникова, Д. А. Кривоблоцкая, Б. Доржджерем Анализ эффективности ионного обмена с учетом степени загрязненности сточных вод……..... 23

В. В. Озерянская, Р. Р. Лазуренко, А. Р. Данилова, Е. В. Лакуш Прогнозирование и количественная оценка аварийных разливов нефтепродуктов при осуществлении перегрузочной деятельности на акватории…….. 33

Э. Г. Хорошун, Ю. В. Есипов Разработка методики возможностной оценки безопасности технической системы «объект захоронения отходов – защита – населенный пункт»…… 47

УДК 628.517.2: 51–74
DOI 10.23947/2541-9129-2017-3-2-17

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА РАСПРОСТРАНЕНИЯ ШУМА НА ОСНОВЕ КОМПЛЕКСНОЙ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ

И. В. Богданова, И. Н. Лоскутникова, К. А. Заяшникова

Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация

bogirka@gmail.com;
Lvica.inna@yandex.ru
kristall-net7@yandex.ru

Представлено исследование формирования акустических полей в производственном помещении механического участка инструментального цеха машиностроительного предприятия. Исследование состояло из нескольких этапов: математического расчета уровней звукового давления (УЗД) в диффузном звуковом поле с применением программной среды *Microsoft Excel*, в ходе которого были получены значения УЗД в 85 точках помещения; разработки комплексной математической модели распространения звука в производственном помещении с использованием среды *Mathcad Application*; формулировки рекомендаций по применению полученной модели. Модель разработана в программной среде PTC *Mathcad Application* версии 15.0 и оптимизирована для решения основных инженерных задач специалиста по охране труда при проведении акустических расчетов. Разработка включает как программные настройки, так и итоговые 3*D*-графики.

Ключевые слова: акустика, шум, диффузное поле, математическая модель, *Mathcad*.

Введение. Среди наиболее распространенных вредных производственных факторов на протяжении многих десятилетий

UDC 628.517.2: 51–74
DOI 10.23947/2541-9129-2017-3-2-17

INVESTIGATION OF NOISE PROPAGATION PROCESS THROUGH INTEGRATED MATHEMATICAL MODEL

I. V. Bogdanova, I. N. Loskutnikova, K. A. Zayashnikova

Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russian Federation

bogirka@gmail.com;
Lvica.inna@yandex.ru
kristall-net7@yandex.ru

The article provides the study of the formation of acoustic fields in the production space of the mechanical area of the tool room of the machine-building enterprise. The study consists of several stages: mathematical calculation of sound pressure levels (SPL) in a diffuse sound field, during which the values of SPL in 85 points of the room were obtained using the Microsoft Exel software environment; development of an integrated mathematical model of sound propagation in a production space using Mathcad Application; formulation of the recommendations on the application of the model obtained. The model is developed in the software of PTC Mathcad Application, version 15.0 and is optimized for the solution of the basic engineering tasks of the occupational safety specialist when performing acoustic calculations. The development includes both software settings and final 3D graphics.

Keywords: acoustics, noise, diffuse field, mathematical model, Mathcad.

Introduction. For many decades, scientists consider noise effects among the most common

ученые особо выделяют шумовые эффекты [1]. Это связано с тем, что отрицательное влияние шума сказывается как на человеческом организме, так и на качестве производственного процесса — прослеживается снижение производительности труда, снижается экономическая эффективность предприятия [2].

Известно большое количество технологических процессов и производств, которые сопровождаются повышенным уровнем шума. Повсеместно, в технологических и конструкторских бюро, компьютерных классах и вычислительных центрах, сборочных, гальванических цехах для создания оптимальных и допустимых параметров воздушной среды используются кондиционеры и вентиляционные устройства, которые являются источниками шума аэродинамического, электромагнитного и механического характера. При древо- и металлообработке среди источников шума выделяют станочный инструмент и оборудование, взаимодействующее с заготовкой (электромеханические и пневматические приводы станков, несбалансированные щетки и роторы электродвигателей, резцы, фрезы, свёрла, пилы и т. п.) [3]. Широкий перечень таких производственных процессов позволяет сделать вывод о том, что проблема исследования шума и его снижения на сегодняшний момент не теряет своей актуальности, несмотря на достаточное количество существующих средств и методов её решения.

Существенным аспектом при решении данной проблемы является интегрирование общеизвестных акустических расчетов в информационную среду с целью исключения влияния человеческого фактора (ошибки) на конечные результаты и увеличения скорости обработки информации многоэлементных и многофакторных расчетов. В целях повышения качества подготовки специалистов

occupational hazards. [1]. This is connected with the fact that the negative impact of noise influence human body and the quality of the production process — we can see the decrease in labor productivity and in economic efficiency of enterprises [2].

There is a large number of technological processes and productions, which are accompanied by the increased noise. Air conditioners and ventilation devices which are sources of aerodynamic, electromagnetic and mechanical noise, are used everywhere, in technological and design departments, computer rooms and data centers, assembly rooms and galvanizing rooms to create the optimal and permissible parameters of air pollution. In woodworking and metalworking among the noise sources, we usually separate machining tools and equipment that interacts with the workpiece (electromechanical and pneumatic drives of machine tools, unbalanced brushes and rotors of electric motors, cutters, mills, drills, saws, etc.) [3]. A wide list of such production processes allows us to conclude that the problem of the study of noise and its reduction at the moment does not lose its relevance, despite a sufficient number of existing tools and methods to resolve it.

An essential aspect in solving this problem is the integration of well-known acoustic calculations in the information environment in order to eliminate the influence of the human factor (errors) on the results and to increase the speed of information processing of multi-element and multi-factor calculations. In order to improve the quality of training of specialists on labor protection, the

по охране труда авторы считают необходимыми разработку и применение комплексной математической модели с использованием компьютерно-информационной среды. Данная модель должна соответствовать основным положениям статистической теории акустики, отражать реальную шумовую ситуацию, представлять в графическом виде результаты моделирования. Целесообразно применение модели как в начале акустических расчётов, так и при контроле эффективности выбранных средств защиты.

Расчет УЗД в исследуемом помещении. Исследование и прогнозирование шума на производстве позволяет вычислить уровень звукового давления в любой точке помещения и определить параметры пространственного распределения звука, следовательно, способствует принятию эффективных решений относительно мер по защите от шума [4].

На рассматриваемом механическом участке были выделены девять источников шума (ИШ), причем наиболее высокий уровень шума отмечен в ИШ1 (станок токарно-центровой 1К625), ИШ6 (листогиб автоматический УВ-1800) и ИШ7 (станок отрезной для пьезокварцевых пластин, 8А607). Эти объекты были исследованы в рамках данной работы (рис. 1).

authors consider necessary to develop and to apply integrated mathematical models using computer-information environment. This model must comply with the main provisions of the statistical theory of acoustics; reflect the real noise situation, present graphically the simulation results. It is advisable to use this model in the beginning of the acoustic calculations as well as in monitoring of the effectiveness of the selected protection equipment.

Calculation of sound pressure level in the study area. The study and prediction of noise at production site allows us to calculate the sound pressure level in any place of the room and to define the parameters of spatial distribution of sound, therefore, it contributes to the effective decision-making concerning measures for protection from noise [4].

In the mechanical area were identified nine noise sources (NS), with the highest noise level recorded in NS 1 (center lathe 1K625), NS 6 (automatic bending machine УВ -1800) and NS 7 (machine for cutting quartz plates 8A607). These objects were investigated in this work (Fig. 1).

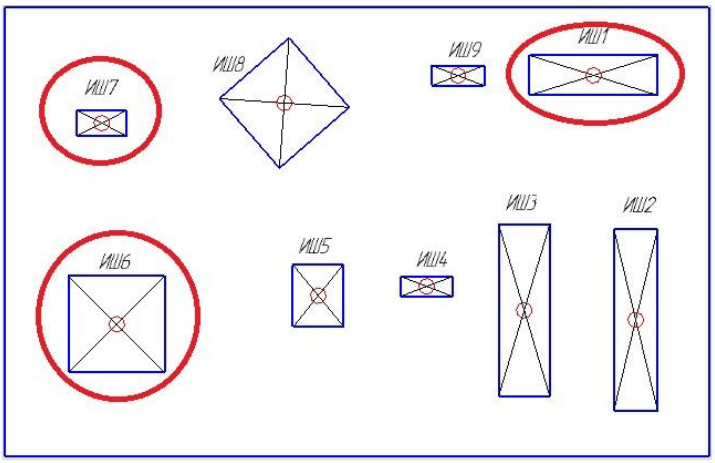

Рис. 1. План механического участка инструментального цеха машиностроительного предприятия с выделением ИШ с наибольшими уровнями звукового давления

Fig. 1. Plan of the tool room mechanical area of the machine-building enterprise with allocation of NS with the highest sound pressure levels.

При стандартных расчётах вычисляют уровни звукового давления (УЗД) в одной, двух либо трёх расчётных точках (РТ) (в зависимости от предъявляемых требований и условий диффузности поля). В данном случае, когда расчёты служат альтернативой эксперименту, количество РТ должно быть необходимым и достаточным для построения поля шума [5], но при этом соответствующим нормативным документам по измерению шума.

На плане участка были определены условные расчётные «точки измерения», с учетом стандартов [5–7]. Для измерения характеристик постоянного шума на участке были построены три координатные системы [8]. Начало координат каждой системы — точки, расположенные в центре соответствующего станка [8]. От горизонтальной линии каждого станка были проведены лучи под углом 45 градусов. Затем определены точки для расчета УЗД:

- первые расчётные точки — на расстоянии 1 м от станка в направлении каждого луча;
- последующие расчетные точки — в направлении каждого луча с шагом 2 м.

Каждая точка была обозначена с помощью трёхразрядной комбинации чисел — *X.X.X*. Первому разряду соответствует номер станка (1, 6, 7); второму — номер луча, вдоль которого располагается точка (от 1 до 4); третьему — номер точки «измерения» (от 1 до 10). Таким образом, авторы получили 85 точек на территории участка (рис. 2).

In the standard calculations, we find the sound pressure levels (SPL) in one, two or three reference points (RP) (depending on the requirements and conditions of field diffuseness). In this case, when the calculations serve as an alternative experiment, the number of RP must be necessary and sufficient to build the noise field [5], but at the same time correspond to regulatory documents on noise measurement.

The reference "points of measurement" were determined on the site plan taking into account standards [5-7]. To measure characteristics of continuous noise, three coordinate systems were built at the site [8]. The coordinate origin of each system is the point, located in the center of the corresponding machine [8]. From the horizontal line of each machine the rays at an angle of 45 degrees were constructed. Then the points to calculate SPL were determined:

- the first reference points at a distance of 1 m from the machine in the direction of each beam;
- follow-up reference points in the direction of each beam in increments of 2 m.

Each point was denoted with three-digit combinations of numbers — X.X.X. First category corresponds to the number of the machine (1, 6, 7); the second is the number of the beam, along which lays the point (1 to 4); third — the measure point number (1 to 10). Thus, the authors have received 85 points on the site (Fig. 2).

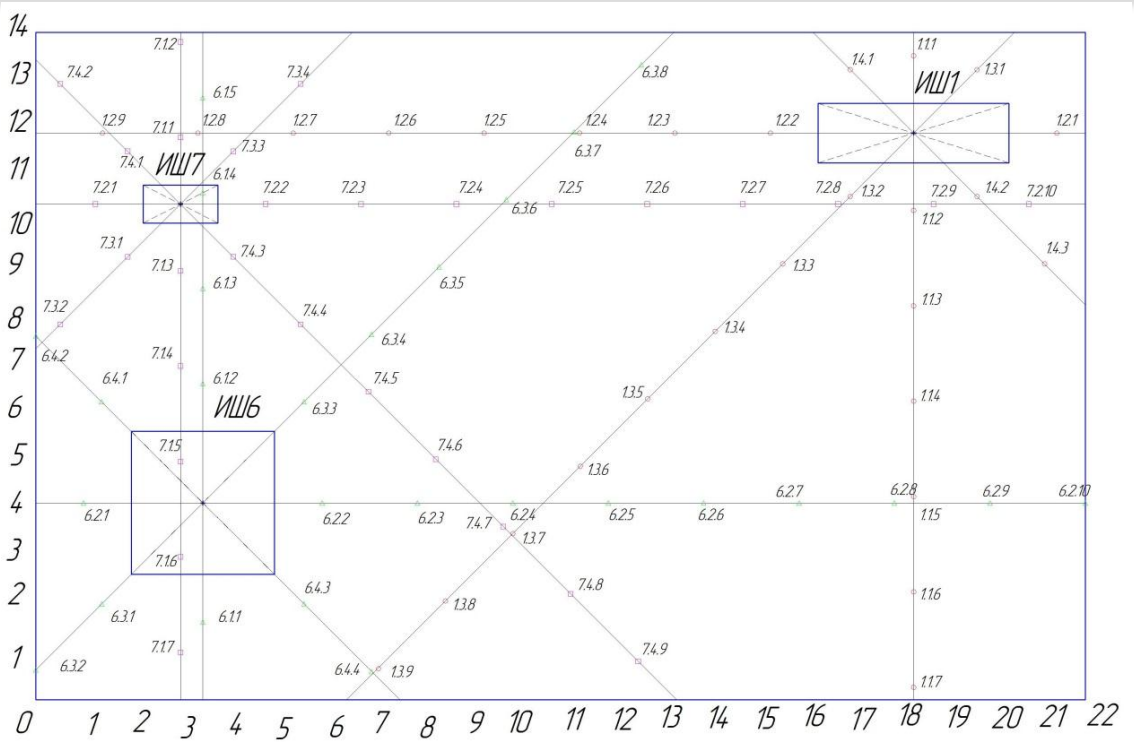

Рис. 2. Схема расположения расчетных точек

Fig. 2. Reference points location scheme

Помещение является соразмерным, поле шума рассматриваемого участка считаем идеально диффузным, акустическая мощность источников, одновременно излучающих звуковую энергию, является постоянной [2]. Для определения октавных уровней звукового давления L_p в дБ в РТ помещения в зоне прямого и отраженного звука [3] используем выражение (1):

$$L_p = 10\lg\left(\sum_{i=1}^{m}\frac{10^{0,1L_{Wi}}\chi_i\Phi_i}{S_i}+\frac{4\psi\cdot(1-\alpha_i)}{\alpha_i\cdot S_{oгp_i}}\sum_{i=1}^{n}10^{0,1L_{Wi}}\right) \qquad (1)$$

В формуле (1) важными исходными данными являются расстояния от РТ до акустических центров ИШ, которые были заранее рассчитаны для каждой точки. Остальные переменные выражения (1) изменяются в каждой выбранной точке и отражаются в результатах расчёта.

Акустический расчет было решено провести с использованием программного продукта *Microsoft Excel* 2010, функции которого отвечают поставленным требованиям к

The room is proportionate, the field noise of the proposed location is believed to be diffuse, the acoustic power of sources simultaneously radiating the sound energy is constant [2]. To determine the octave sound pressure levels L_p in dB in RP of the facilities in the area of direct and reflected sound [3] we use the expression (1):

$$L_p = 10\lg\left(\sum_{i=1}^{m}\frac{10^{0,1L_{Wi}}\chi_i\Phi_i}{S_i}+\frac{4\psi\cdot(1-\alpha_i)}{\alpha_i\cdot S_{oгp_i}}\sum_{i=1}^{n}10^{0,1L_{Wi}}\right) \qquad (1)$$

In the formula (1) the distance from the RP to the acoustic centers of the NS is an important input data which was pre-calculated for each point. Other variables of the expression (1) change in each selected point and are reflected in the calculation results.

The acoustic calculation was solved using *Microsoft Excel* 2010, functions of which meet the requirements to mathematical and, in

точности математических и, в частности, акустических расчётов. В выбранной среде был составлен шаблон акустического расчёта РТ, который представляет собой книгу *Microsoft Excel*. Шаблон использовался для получения численных значений УЗД во всех точках по формуле (1) [3]. Особенность данного шаблона состояла в операторском контроле значения коэффициента χ, изменяющегося по графику, и значения коэффициента *m*, зависящего от минимального *r* [2].

На рис. 3 приведён скриншот результатов расчета уровней звукового давления в точке № 1.2.4.

particular, acoustic calculations precision. The pattern of acoustic calculation of RP was built in the selected medium, which is a *Microsoft Excel* book. The pattern was used to obtain the numerical values of SPL in all points according to the formula (1) [3]. The peculiarity of this pattern was in the operator control of the value of the coefficient χ, varying from a plot, and the values of the coefficient *m* depending on the minimum *r* [2].

Fig. 3 shows a screenshot of the results of calculation of sound pressure levels at the point no. 1.2.4.

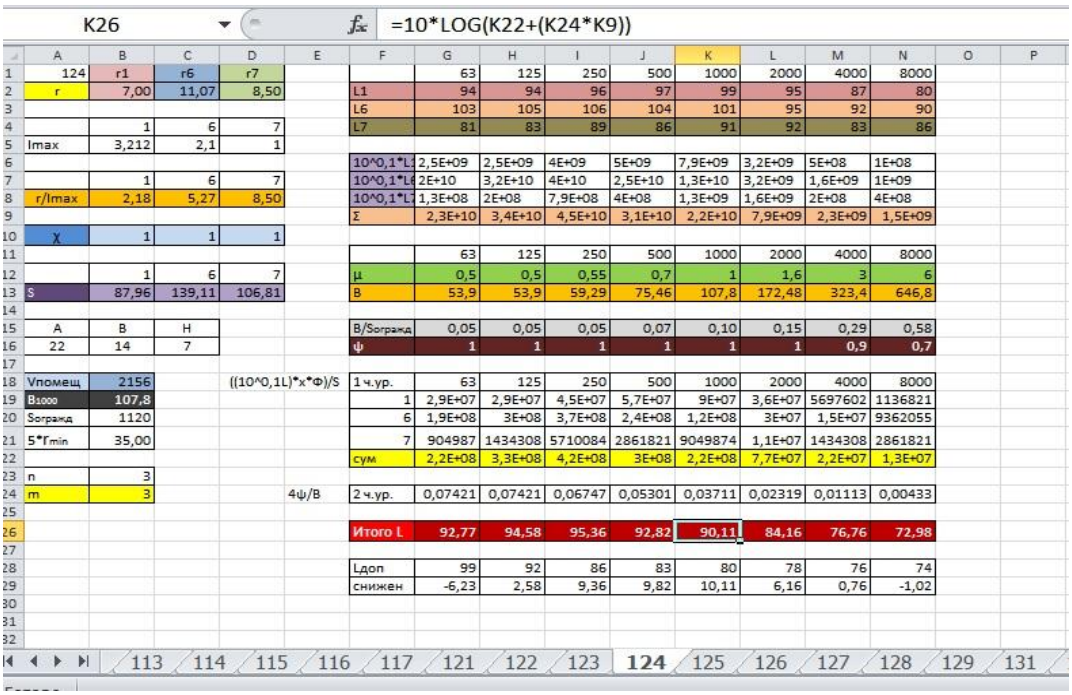

Рис. 3. Расчёт уровней звукового давления в точке № 1.2.4

Fig. 3. Calculation of sound pressure levels at the point No. 1.2.4

Таким образом были определены УЗД по всем октавным полосам в 85 РТ. Для удобства по рассчитанным данным была составлена графическая модель (линии уровня) механического участка, отображающая значения всех РТ и представленная на рис. 4.

Thus SPL were determined for all octave bands in 85 RP. For convenience, the calculated data was compiled in a graphical model (level line) of the mechanical area that displays the values of all RP and is shown in Fig. 4.

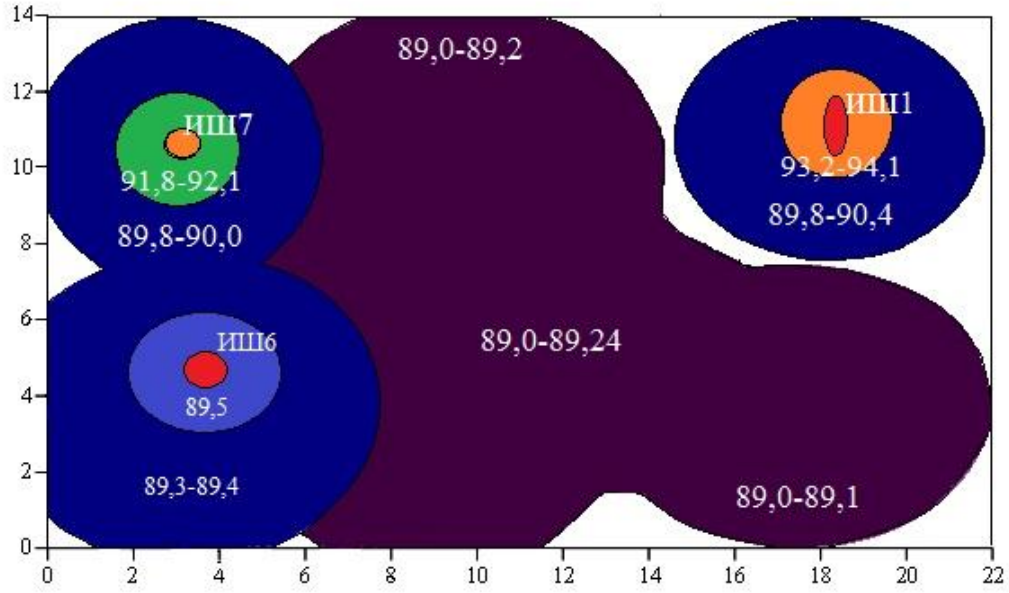

Рис. 4. Линии уровня рассчитанных УЗД

Fig. 4. Level lines of the calculated SPL

Данная графическая модель является общим полем распространения шума на исследуемом участке. Стоит отметить, что поля шума на участке, в соответствии с уровнем звукового давления внутри зоны, были выделены цветом так, что снижение уровня звукового давления происходит от красного (95,0 дБ) к темно-фиолетовому (89,0 дБ) [9].

Проведенные исследования показали, что каждый ИШ создает свое уникальное звуковое поле. Поле наиболее высокого уровня (от 89,3 до 92,1 дБ, при норме 75 дБ) расположено на расстоянии в среднем 2 м от ИШ [8]. При этом именно в указанной зоне расположены рабочие места операторов, обслуживающих оборудование. Отметим, что на исследуемом участке операторы подвергаются воздействию полей шума от источников, расположенных на расстоянии 5 м друг от друга. Это отчетливо прослеживается по общей зоне суммирования полей шума от ИШ6 и ИШ7, выделенной на рис. 2 синим цветом [9].

Помимо операторов станков, звуковое поле со значениями звукового давления от 89,0 до 89,2 дБ (зона темно-фиолетового цвета), общей площадью 140 м^2, также превышает нормативные значения и может воздействовать

This graphical model is a general field of noise propagation on the site. It should be noted that the noise fields at the site, in accordance with the sound pressure level inside the zone were highlighted so that the reduction in sound pressure level goes from red (95.0 dB) to dark purple (89.0 dB) [9].

The studies have shown that each NS creates its own unique sound field. The field of the highest level (from 89.3 to 92.1 dB, at a rate of 75 dB) is located at a distance of approximately 2 m from the NS [8]. It is precisely in this area where there are workplaces of operators serving equipment. It should be noted that at the site the operators are exposed to the noise fields from the sources located at a distance of 5 m from each other. This is evident by the total area summation of the noise fields from NS 6 and NS 7, which are highlighted in Fig. 2 in blue [9].

In addition to operators, a sound field with sound pressure values from 89.2 to 89.0 dB (dark purple area), with a total area of 140 m^2, also exceeds normative values and can affect the

на работников механического участка, чья профессиональная деятельность не связана с обслуживанием какого-либо оборудования, являющегося источником повышенного уровня шума [9].

Комплексная математическая модель. Для реализации комплексной математической модели было решено воспользоваться программной средой *Mathcad Application*, версии 15.0. Данный выбор был осуществлён в связи с тем, что программная среда *Mathcad* относится к классу специальных систем автоматизированного проектирования, ориентированных на подготовку интерактивных документов с визуальным сопровождением вычислений [10]. Кроме того, среда отличается относительной простотой использования и имеет интуитивный интерфейс пользователя. Набор функций полностью удовлетворяет всем инженерным требованиям промышленной акустики.

Отметим основные допущения моделирования:

- выражение (1) состоит из двух элементов: первый — уровень звукового давления прямого звука ($L_п$), второй — отраженного ($L_о$); итоговый уровень звукового давления (L_p) — сумма результатов вычислений первого и второго элементов;
- модель разрабатывалась для УЗД на среднегеометрической частоте 1000 Гц;
- переменные χ, B, Ф (в программных расчётах — $Ф_о$), ψ, а также шумовые характеристики источников L_1=99 дБ (ИШ1), L_2=91 дБ (ИШ6), L_3=101 дБ (ИШ7) соответствуют среднегеометрической частоте 1000 Гц;
- для построения графика участка введены значения координат x, y, z всех трёх ИШ, при этом ИШ1 соответствуют координаты $x1$, $y1$, $z1$, ИШ6 — $x2$, $y2$, $z2$, а ИШ7 — $x3$, $y3$, $z3$. Для получения модели в трёхмерном пространстве задано контрольное значение координаты z, равное 2;
- источники шума приняты точечными, пульсирующими в пространстве (S=4πr);

workers of the mechanical area whose professional activity is not connected with service of any equipment that is a source of high level noise [9].

Integrated mathematical model. For the implementation of an integrated mathematical model, it was decided to use the software environment *Mathcad Application*, version 15.0. This choice was made due to the fact that the software *Mathcad* belongs to a class of special computer-aided design, for the preparation of interactive documents with visual computing [10]. In addition, the environment is relatively easy to use and has an intuitive user interface. The function set meets all engineering requirements of industrial acoustics.

Let us note the main assumptions of the simulation:

- the expression (1) consists of two elements: the first is the sound pressure level of the direct sound ($L_п$), the second — of the reflected one ($L_о$); the resulting sound pressure level (L_p) is the sum of the calculation results of the first and second elements;
- the model was developed for SPL at a geometric mean frequency of 1000 Hz;
- the variables χ, B, Ф (in the software calculations — $Ф_о$), ψ, and noise characteristics of sources L_1=99 dB (NS 1), L_2=91 dB (NS 6), L_3=101 dB (NS 7) correspond to the geometric mean frequency of 1000 Hz;
- to construct the graph of the site we enter the coordinates x, y, z of all three NSs, with NS 1 corresponding to the coordinates $x1$, $y1$, $z1$, NS 6 — $x2$, $y2$, $z2$, and NS 7 — $x3$, $y3$, $z3$. To get a model in three-dimensional space we set the reference value of z-coordinate, which equals to 2;
- the noise sources are believed to be point, pulsating in space (S=4πr);

- площадь ограждающих поверхностей составляет 812 м^2, в неё входят площадь стен и потолка;
- α=0,1 при отсутствии звукопоглощающих облицовок.

Описанные условия, характеристики и выражения были занесены в документ, созданный в *Mathcad* 15.0. На рис. 5 представлен фрагмент разработанной математической модели.

- the area of the enclosing surfaces is 812 m^2, it includes area of the walls and the ceiling;
- α=0,1 in the absence of sound-absorbing linings.

The described conditions, characteristics and expressions were written in a document that was created in *Mathcad* 15.0. Fig. 5 shows a fragment of the developed mathematical model.

$L1 := 99 \quad L2 := 101 \quad L3 := 91 \quad S := 812$

$B := 107.8 \quad \chi := 1 \quad \Phi o := 1 \quad \alpha := 0.1 \quad \psi := 1$

$x1 := 18.4 \quad y1 := 11.9 \quad z1 := 1 \quad z := 2$

$x2 := 3.5 \quad y2 := 4.2 \quad z2 := 1$

$x3 := 3 \quad y3 := 10.4 \quad z3 := 1$

$$Ln(x,y) := \left(\frac{1}{4\cdot\pi}\right)\cdot\left[\frac{10^{0.1\cdot L3}\cdot\chi\cdot\Phi o}{\left[(x-x3)^2+(y-y3)^2+(z-z3)^2\right]}+\frac{10^{0.1\cdot L2}\cdot\chi\cdot\Phi o}{\left[(x-x2)^2+(y-y2)^2+(z-z2)^2\right]}+\frac{10^{0.1\cdot L1}\cdot\chi\cdot\Phi o}{\left[(x-x1)^2+(y-y1)^2+(z-z1)^2\right]}\right]$$

$$Lo(x,y) := \left(\frac{4\cdot\psi}{\alpha\cdot S}\right)\cdot\left[\left(10^{0.1\cdot L1}+10^{0.1L2}+10^{0.1L3}\right)\cdot(1-\alpha)\right]$$

$$Lp(x,y) := 10\cdot\log(Ln(x,y)+Lo(x,y))$$

Рис. 5. Фрагмент математической модели, созданной в *Mathcad* 15.0

Fig. 5. A fragment of the mathematical model created in Mathcad 15.0

Финальной стадией разработки явилось построение 3*D*-графика по описанным зависимостям — графика уровня звукового давления L_p. Изначально был построен график поверхности с соблюдением соотношений всех геометрических размеров помещения, изображённый на рис. 6. Для наглядности восприятия применён компонент «карта цветов» по приращению *z* (L_p) — «Радуга».

The final stage of the development was the construction of a 3D graphics according to the described dependencies - the graph of sound pressure level L_p. Originally the graph of the surface was built with the observance of the ratios of all geometric dimensions of the room depicted in Fig. 6. For better visual perception we applied the "color map" on the increment z (L_p) — "rainbow".

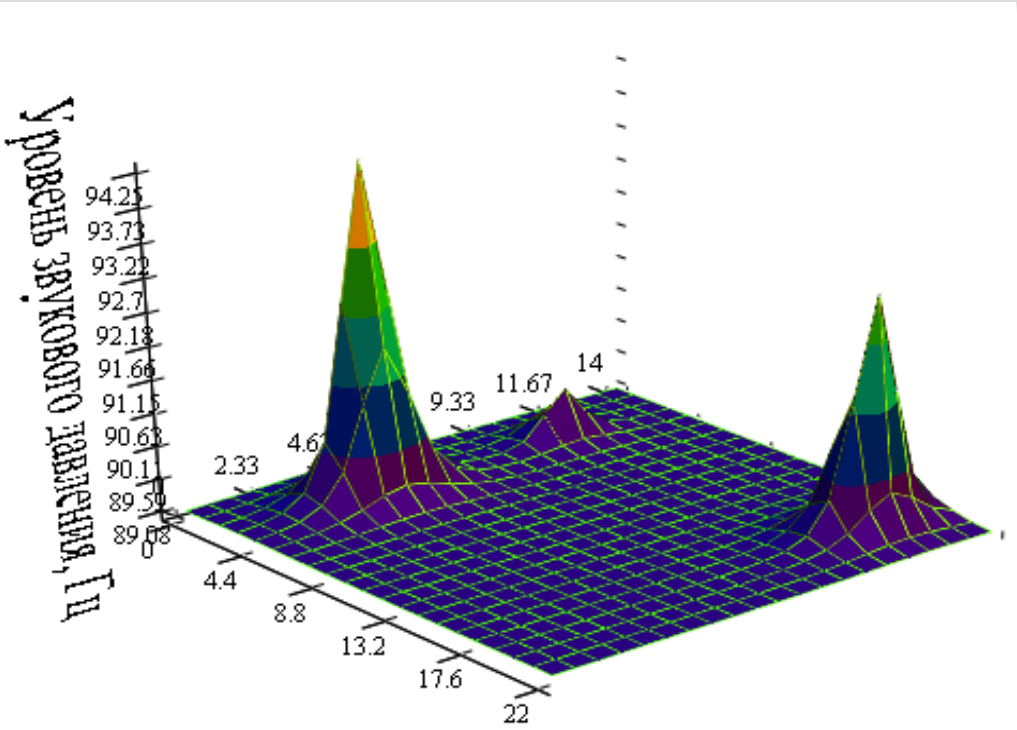

Рис. 6. График поверхности УЗД

Fig. 6. The graph of SPL surface

Однако данный вид 3*D*-графика, несмотря на свою наглядность, не позволяет проследить с необходимой точностью распределение уровней звука в пространстве, поэтому было принято решение о замене графика поверхности «линиями уровня», рис. 7.

However, this kind of 3D graphics, despite its visual aspects, does not allow us to trace with precision the distribution of sound levels in space, so the decision was made to replace the graphics surface with "level lines", Fig. 7.

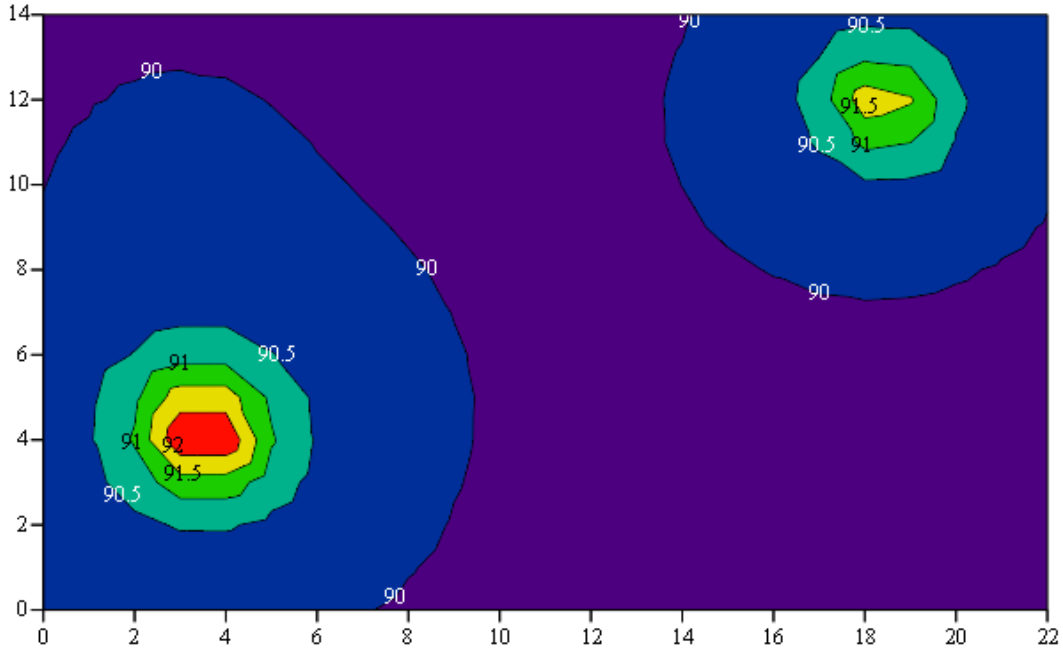

Рис. 7. Линии уровня ЗД

Fig. 7. PL level lines

На полученном графике ярко выражено суммирование энергий и образование области с одинаковыми показателями УЗД, равными 90 дБ, охватывающей два соседних источника шума: ИШ6 и ИШ7. ИШ1 не попадает в эту область в связи с его удалённостью от двух остальных источников.

В целях проверки адекватности разработанной модели было проведено сравнение шумовых полей, полученных в результате расчета (рис. 4) и моделирования (рис. 7). Сравнительный анализ показывает, что шумовые картины графиков имеют сходные черты (дублируется характерная область суммации шумовых полей ИШ6 и ИШ7), а также что расхождения в данных цветовых областей незначительны и составляют от 0,5 до 3 дБ (что пренебрежимо мало для акустических расчетов) при коэффициенте корреляции 0,87–0,95.

Полученные выводы дают основание характеризовать разработанную модель как адекватную, что позволяет проводить дальнейшие исследования распределения УЗД на участке с использованием различных комбинаций работающих источников согласно технологическому процессу.

Исследование эффективности шумозащиты с помощью разработанной модели. Доказанная адекватность разработки позволяет использовать предлагаемую модель в области оценки эффективности шумозащиты, что подтверждают графики УЗД, представленные на рис. 8–10. Так, на рис. 8 изображен график УЗД механического участка при применении звукопоглощающей облицовки с коэффициентом звукопоглощения на среднегеометрической частоте 1000 Гц при α=0,5, на рис. 9 при α=0,7, а на рис. 10 при α=0,9.

On the resulting chart, it is evident the summation of energies and the formation of an area with the same SPL of 90 dB, covering the two neighboring noise sources: NS 6 and NS 7. NS 1 does not fall into this region due to its distance from the other two sources.

In order to verify the adequacy of the developed model we have compared the noise fields, obtained in the result of the calculation (Fig. 4) and the simulation (Fig. 7). The comparative analysis shows that the noise pattern graphs have similarities (the same characteristic region of the summation of noise fields NS 6 and NS 7), and also that the difference in the color areas are minor and range from 0.5 to 3 dB (which is negligible for the acoustic calculations) with the correlation coefficient 0.87–0.95.

The findings provide a basis to characterize the developed model as adequate, allowing further studies of the distribution of SPL at the site using different combinations of sources according to the technological process.

The study of the efficiency of noise protection using the developed model. The proven adequacy of the design allows us to use the proposed model in evaluation of the effectiveness of noise insulation, which is confirmed by the graphs of SPL, shown in Fig. 8-10. Thus, Fig. 8 shows a graph of SPL mechanical part when using sound-absorbing lining with a coefficient of absorption at a geometric mean frequency of 1000 Hz when α=0,5, and in Fig. 9 with α=0,7, in Fig. 10 with α=0,9.

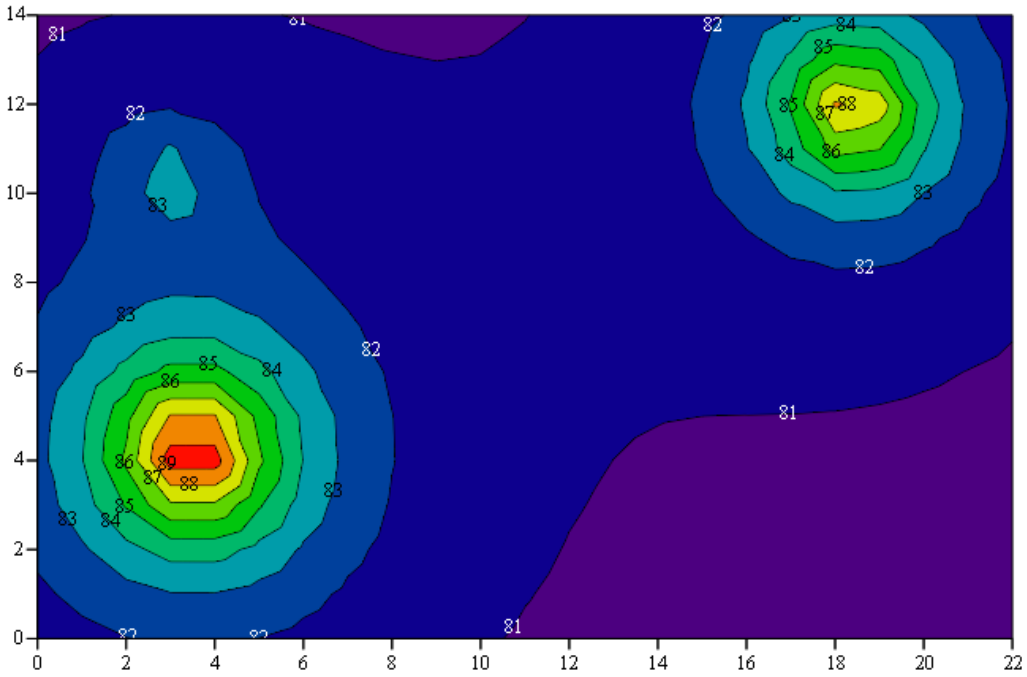

Рис. 8. УЗД при α=0,5

Fig. 8. SPL with α=0,5

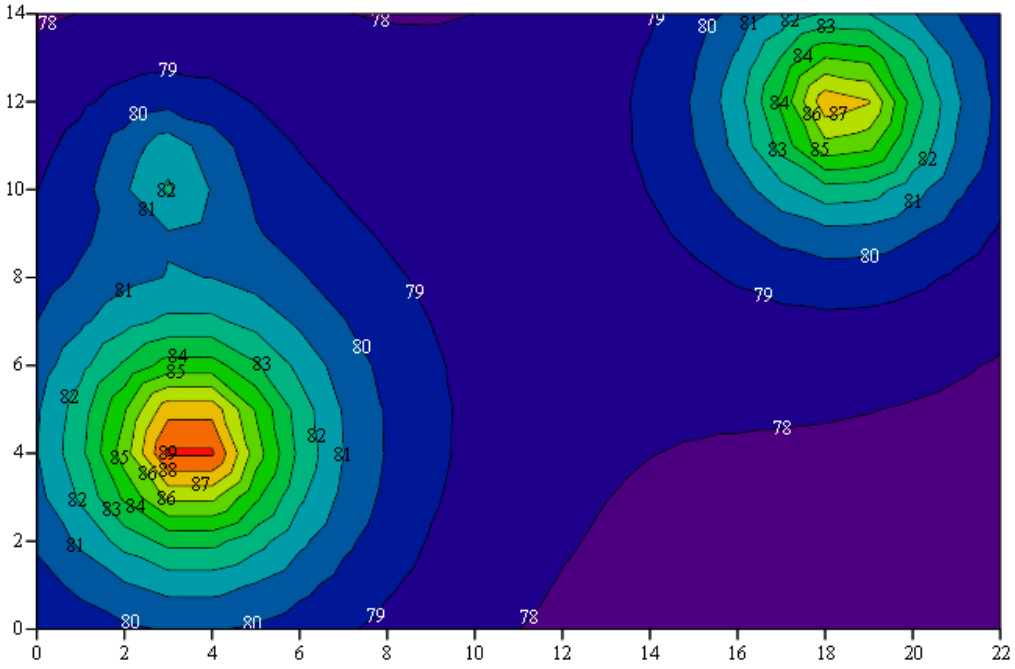

Рис. 9. УЗД при α=0,7

Fig. 9. SPL with α=0,7

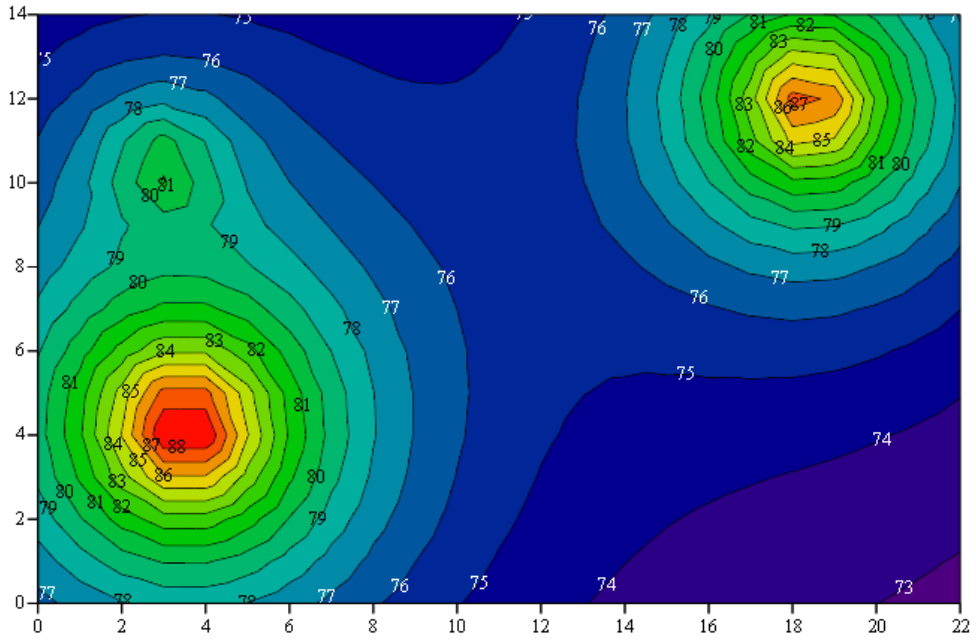

Рис. 10. УЗД при α=0,9

Fig. 10. SPL at α=0,9

Изменение границ распространения полей шума является наглядным отображением повышения эффективности шумозащиты при увеличении коэффициента звукопоглощения α от 0,5 до 0,9 (наблюдается снижение УЗД на рабочих местах на 8–13 дБ).

Заключение. Результаты исследования указывают на то, что применение разработанной математической модели позволяет:

- исследовать особенности распространения и выявить участки наибольшей концентрации (участки суммации) шума в производственном помещении [12];
- оценить вероятность расположения рабочих мест в зонах с превышением уровня звукового давления [11];
- выполнить анализ рационального размещения оборудования и рабочих мест в производственном помещении с учетом влияния акустического фактора [13, 14];
- предложить наиболее эффективные методы и средства снижения шума, а также оценить эффективность существующих средств коллективной защиты [13, 14].

По итогам проделанной работы авторы

Boundaries change of the noise fields is a clear example of the increase in the efficiency of noise protection with increasing absorption coefficient α from 0,5 to 0,9 (a decrease of SPL at the workplace 8–13 dB).

Conclusion. The results of the study indicate that the application of the developed mathematical model makes it possible:

- to study peculiarities of distribution and to identify the areas of greatest concentration (summation areas) of noise in the workplace [12];
- to assess the probability of the location of workplaces in areas with higher sound pressure level [11];
- to perform analysis of rational location of equipment and workplaces in the production area taking into account the influence of acoustic factors [13, 14];
- to offer the most effective methods and means of noise reduction, as well as to assess the effectiveness of existing collective protection [13, 14].

On that basis, the authors consider it possible

считают возможным рекомендовать внедрение модели и отдельных её компонентов в следующие процессы:

- проектирование и анализ акустической нагрузки производственных помещений, оценка шумового загрязнения окружающей среды;
- подготовка бакалавров направления «Техносферная безопасность» (при разработке электронных учебно-методических комплексов);
- дополнительное образование по направлению «Техносферная безопасность» (для обучения использованию информационных технологий при акустических расчетах);
- обучение работников промышленных предприятий основам охраны труда (в качестве наглядного материала);
- процедура специальной оценки условий труда (для оценки акустического фактора).

Библиографический список.

1. Алексеев С. В. Производственный шум / С. В. Алексеев и др. — Ленинград : Медицина, 1991. — 136 с.

2. Иванов, Н. И. Инженерная акустика. Теория и практика борьбы с шумом / Н. И. Иванов. — Москва : Логос, 2013. — 423 с.

3. Акустика. Рекомендуемые методы проектирования малошумных рабочих мест производственных помещений. Часть 3. Распространение звука в производственных помещениях и прогнозирование шума : ГОСТ Р 52797.3–2007 [Электронный ресурс] / Библиотека ГОСТов и нормативов. — Режим доступа : https://ohranatruda.ru/ot_biblio/normativ/data_normativ/53/53204/ (дата обращения : 26.02.17).

4. Методы измерения шума на рабочих местах (с Изменением № 1) : ГОСТ 12.1.050-86 ССБТ. Межгосударственный стандарт [Электронный ресурс] / Библиотека ГОСТов и нормативов. — Режим доступа :

to recommend the implementation of the model and its individual components in the following processes:

- design and analysis of acoustic load of production areas, assessment of noise pollution of the environment;
- preparation of bachelors in "Technosphere safety" (when developing electronic educational-methodical complexes);
- additional education in "Technosphere safety" (training in the use of information technology in acoustic calculations);
- training of industrial workers in the basics of occupational safety (illustrative material);
- procedure for special assessment of working conditions (for the evaluation of the acoustic factor).

References.

1. Alekseev, S.V. et al. Proizvodstvenny shum. [Industrial noise.] Leningrad, Meditsina, 1991, 136 p. (in Russian).

2. Ivanov, N.I. Inzhenernaya akustika. Teoriya i praktika bor'by s shumom. [Engineering acoustics. Theory and practice of noise control.] Moscow, Logos, 2013, 423 p. (in Russian).

3. Akustika. Rekomenduemye metody proektirovaniya maloshumnykh rabochikh mest proizvodstvennykh pomesheniy. Chast' 3. Rasprostranenie zvuka v proizvodstvennykh pomeshheniyakh i prognozirovanie shuma: GOST R 52797.3–2007. Biblioteka GOSTov i normativov. [Acoustics. Recommended methods for designing low-noise workplaces of industrial premises. Part 3. Sound propagation in industrial premises and noise forecasting: GOST R 52797.3–2007. Library of standards and regulations.] Available at: https://ohranatruda.ru/ot_biblio/normativ/data_normativ/53/53204/ (accessed: 26.02.17) (in Russian).

4. Metody izmereniya shuma na rabochikh mestakh (s izmeneniem no.1) GOST 12.1.050-86 SSBT. Mezhgosudarstvenny standart. Biblioteka GOSTov i normativov. [Methods of noise measurement at work places (with amendment no. 1): GOST 12.1.050-86 SSBT. Interstate standard. Library of standards and

https:// ohranatruda.ru /ot_biblio /normativ/data_normativ/6/6337/ (дата обращения : 15.02.17).

5. Измерения шума для оценки его воздействия на человека : ГОСТ Р ИСО 9612-2013 [Электронный ресурс] / Профессиональные справочные системы Техэксперт. Нормы, правила, стандарты по техрегулированию. — Режим доступа : http://docs.cntd.ru/document/1200107818 (дата обращения : 20.02.17).

6. Шабарова, О. Н. Построение полей распространения шума на участке листовой штамповки металлообрабатывающего предприятия / О. Н. Шабарова, С. В. Бойко, А. А. Пасхина. — Кострома, изд-во КГТУ, 2013 — 693 с.

7. Шум машин. Определение уровней звуковой мощности источников шума по звуковому давлению : ГОСТ Р 51401–99 (ИСО 3744–94) [Электронный ресурс] / Профессиональные справочные системы Техэксперт. Нормы, правила, стандарты по техрегулированию. — Режим доступа : http:// docs.cntd.ru /document/1200107818 (дата обращения : 20.02.17).

8. Защита от шума. Актуализированная редакция : СНиП 23-03-2003. СП 51.13330.2011 [Электронный ресурс] / Профессиональные справочные системы Техэксперт. Нормы, правила, стандарты по техрегулированию. — Режим доступа : http://docs.cntd.ru/document/1200084097 (дата обращения : 20.01.17).

9. Заяшникова, К. А. Построение полей распространения шума на участке механической обработки / К. А. Заяшникова, И. В. Богданова — Ростов-на-Дону : Изд. центр ДГТУ, 2016. — 47 с.

regulations.] Available at: ohranatruda.ru /ot_biblio /normativ/data_normativ/6/6337/ (accessed: 15.02.17) (in Russian).

5. Izmeremiya shuma dlya otsenki ego vozdeystviya na cheloveka: GOST R ISO 9612-2013. Professional'nye spravochnye sistemy Tekhekspert. Normy, pravila, standarty po tekhregulirovaniyu. [Noise measurement for evaluation of its effect on human: GOST R ISO 9612-2013. Professional reference system Tekhexpert. Rules, regulations, standards on technical regulation.] Available at: http://docs.cntd.ru/document/1200107818 (accessed: 20.02.17) (in Russian).

6. Shabarova, O.N., Boyko, S.V., Paskhina, A.A. Postroenie poley rasprostraneniya shuma na uchastke listovoy shtampovki metalloobrabatyvayushego predpriyatiya. [Construction of fields of noise propagation on sheet metal stamping of metal working enterprise.] Kostroma, Izdatel'stvo KSTU, 2013, 693 p. (in Russian).

7. Shum mashin. Opredelenie urovney zvukovoy moshchnosti istochnikov shuma po zvukovomu davleniyu: GOST R 51401-99 (ISO 3744-94). Professional'nye spravochnye sistemy Tekhekspert. Normy, pravila, standarty po tekhregulirovaniyu. [Car noise. Determination of sound power levels of noise sources through sound pressure: GOST R 51401-99 (ISO 3744-94). Professional reference system Tekhexpert. Rules, regulations, standards on technical regulation.] Available at: http:// docs.cntd.ru /document/1200107818 (accessed: 20.02.17) (in Russian).

8. Zashita ot shuma. Aktualizirovannaya redaktsiya: SNiP 23-03-2003. SP 51.13330.2011. Professional'nye spravochnye sistemy Tekhekspert. Normy, pravila, standarty po tekhregulirovaniyu. [Protection from noise. Updated version: SNiP 23-03-2003. SP 51.13330.2011. Professional reference system Tekhekspert. Rules, regulations, standards on technical regulation.] Available at: http://docs.cntd.ru/document/1200084097 (accessed: 20.01.17) (in Russian).

9. Zayashnikova, K.A., Bogdanova, I. V. Postroenie poley rasprostraneniya shuma na uchastke mekhanicheskoy obrabotki. [Construction of fields of noise propagation on the part mechanical processing.] Rostov-on-Don, Izd. tsentr of DSTU, 2016, 47 p. (in Russian).

10. Заяшникова, К. А. Подготовка лабораторной работы по дисциплине «Промышленная акустика» / К. А. Заяшникова, И. В. Богданова. — Краснодар : ИПЦ КубГУ, 2017. — 60 с.

11. *Mathcad* / Википедия. Свободная энциклопедия [Электронный ресурс]. – Режим доступа : https://ru.wikipedia.org/wiki/Mathcad (дата обращения : 10.03.2017).

12. Чукарин, А. Н. Теория и методы акустических расчетов и проетирования технологических машин для механической обработки / А. Н. Чукарин. — Ростов-на-Дону : Изд. центр ДГТУ, 2004. — 152 с.

13. Аствацатуров, А. Е. Расчёты по безопасности и экологичности процессов и производств / А. Е. Аствацатуров. — Ростов-на-Дону : Изд. центр ДГТУ, 2004. — 77 с.

14. Месхи, Б. Ч. Расчет и выбор технических средств обеспечения безопасности / Б. Ч. Месхи. — Ростов-на-Дону : Изд. центр ДГТУ, 2009. — 191 с.

Поступила в редакцию 03.05.2017
Сдана в редакцию 05.05.2017
Запланирована в номер 05.06.2017

Богданова Ирина Виссарионовна,
кандидат технических наук, доцент Донского государственного технического университета,
(РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1)
bogirka@gmail.com

Лоскутникова Инна Николаевна,
Кандидат химических наук, доцент Донского государственного технического университета,
(РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1)
Lvica.inna@yandex.ru

Заяшникова Кристина Александровна,
Бакалавр Донского государственного технического университета,
(РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1)
kristall-net7@yandex.ru

10. Salnikova, K. A. Podgotovka laboratornoy raboty po distsipline “Promyshlennaya akustika”. [Preparation of laboratory work on discipline “Industrial acoustics”.] Krasnodar, IPTS KubGU, 2017, 60 p. (in Russian).

11. Mathcad. Wikipedia. Free encyclopedia. Available at: https://ru.wikipedia.org/wiki/Mathcad (accessed: 10.03.2017) (in Russian).

12. Chukarin, A.N. Teoriya i metody akusticheskikh raschetov i proektirovaniya tekhnologicheskikh mashinbdlya mekhanicheskoy obrabotki. [Theory and methods of acoustic calculations and designing of technological machines for machining.] Rostov-on-Don: Izd. tsentr DSTU, 2004, 152 p. (in Russian).

13. Astvatsaturov, A.E. Raschety po bezopasnosti i ekologichnosti protsessov i proizvodstv. [Calculations of safety and environmental performance of processes and production.] Rostov-on-Don: Izd. tsentr DSTU, 2004, 77 p. (in Russian).

14. Meskhi, B.C. Raschet i vybor tekhnicheskikh sredstv obespecheniya bezopasnosti. [Calculation and selection of technical means of safety provision.] Rostov-on-Don: Izd. tsentr DSTU, 2009, 191 p. (in Russian).

Received 03.05.2017
Submitted 05.05.2017
Scheduled in the issue 05.06.2017

Bogdanova Irina Vissarionovna,
Cand. of techn. Sciences, Associate professor of Don State Technical University (Gagarin sq., 1, Rostov-on-Don, Russian Federation)
bogirka@gmail.com

Loskutnikova Inna Nikolaevna
Cand. of chem. Sciences, Associate professor of Don State Technical University (Gagarin sq., 1, Rostov-on-Don, Russian Federation)
Lvica.inna@yandex.ru

Zayashnikova Kristina Aleksandrovna,
Bachelor’s degree student of Don State Technical University (Gagarin sq., 1, Rostov-on-Don, Russian Federation)
kristall-net7@yandex.ru

УДК 614.841.131.2
DOI 10.23947/2541-9129-2017-3-18-22

МИНИМИЗАЦИЯ СЛЕЖИВАЕМОСТИ И УВЕЛИЧЕНИЕ ТЕКУЧЕСТИ ОГНЕТУШАЩИХ ПОРОШКОВ

В. Л. Адамян, Д. А. Ульмейкин

Донской государственный технический университет,
г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация

Vla1345@yandex.ru
777bigdan@mail.ru

Рассматриваются актуальные вопросы по обеспечению пожарной безопасности промышленных объектов нефтехимии. Наиболее эффективным является тушение пожаров легковоспламеняющихся жидкостей порошковыми составами. Одним из новых предложений композитного состава огнетушащих порошков является введение в состав основной соли алюмо-калиевых квасцов, снижающих слеживаемость и увеличивающих текучесть порошка.

Термографический анализ, а также кинетические показатели поведения алюмо-калиевых квасцов позволяют говорить о благонадежной степени обеспечения пожарной безопасности оборудования и аппаратов на химических и нефтеперерабатывающих заводах

Ключевые слова: алюмо-калиевые квасцы, дегидратация, десульфуризация, композитный состав, огнетушащий порошок.

Введение. В постиндустриальный период в российской нефтехимической промышленности наблюдаются темпы роста, опережающие темпы роста мирового ВВП [1]. Синтез новых продуктов, присадок расширяет ассортимент новых горючих веществ и материалов, что указывает на необходимость и актуальность усиления пожарного надзора на предприятиях, вырабатывающих химическую и нефтехимическую продукцию.

Становление и развитие инновационных процессов и технологий сопровождаются разработкой унифицированных огнетушащих

UDC 614.841.131.2
DOI 10.23947/2541-9129-2017-3-18-22

MINIMIZATION OF CAKING AND FLOW RATE INCREASE OF FIRE EXTINGUISHING POWDERS

V. L. Adamyan, D. A. Ulmeykin

Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russian Federation

Vla1345@yandex.ru
777bigdan@mail.ru

The article considers topical issues of ensuring fire safety of industrial facilities of the petrochemical industry. The most effective is the extinguishing of flammable liquids fires by powders. One of the new proposals in composition of fire-extinguishing powders is an introduction to the composition the basic salt of aluminum potassium alum, which reduces the caking and increasing the flow rate of the powder.

Thermal analysis and kinetic indicators of the behavior of aluminum-potassium alum allow us to speak about the reliability of fire safety equipment and apparatus for chemical and oil refineries.

Keywords: aluminum-potassium alum, dehydration, desulfurization, composite structure, fire-extinguishing powder.

Introduction. In the post-industrial period in the Russian petrochemical industry, we may observe the growth rate, which is higher than the growth of world GDP [1]. The synthesis of new products, additives expands the range of new combustible substances and materials, which indicates the necessity and urgency to strengthen fire supervision on enterprises producing chemical and petrochemical products.

The formation and development of innovative processes and technologies is characterized by the development of a unified fire extinguishing

средств, а также масштабными исследованиями. В последние десятилетия наиболее интенсивно идет разработка огнетушащих порошков, представляющих собой мелкодисперсные минеральные соли с различными добавками для придания им текучести и снижения слеживаемости.

Постановка задачи. К основным задачам, решаемым с помощью новых составов огнетушащих средств, являются повышение текучести и снижение слеживаемости огнетушащих порошков.

Новые технологии и оборудование обуславливают высокие требования к квалификации работников.

Знания теоретических основ динамики развития и тушения пожаров на нефтехимических предприятиях являются обязательными для руководителей высших звеньев организации, а также для работников среднего звена — начальников цехов, технологов, мастеров, аппаратчиков химической и нефтехимической промышленности. Важными параметрами для определения степени пожарной опасности являются температура вспышки, самовоспламенения, температурные пределы воспламенения и др.

Адиабатическая температура горения предполагает расход всего выделяющегося тепла на нагрев продуктов горения. Но, поскольку диффузионное горение сопровождается обменом тепла в окружающую среду, действительная температура, развивающаяся при пожаре, как правило, на 30–50 % меньше теоретической. Так, теоретическая температура горения бензина равна 1730°С, а при пожаре резервуара с бензином развивается температура до 1400°С. Горение бензина может быть локализовано мелко распыленной водой, пеной или порошком. Однако тушение водой может нежелательно, так как разность плотностей горючего и воды может привести к осложнениям при локализации огня. Наиболее эффективным является порошковое огнетушение.

agents, as well as large-scale studies. In recent decades, there goes the most intensive development of fire extinguishing powders, consisting of finely dispersed mineral salts with various additives to make them flow and reduce caking.

Statement of the problem. The main tasks solved with the help of new compositions of extinguishing agents are increasing fluidity and reducing caking of fire extinguishing powder.

New technology and equipment lead to high demands on workers' skills.

Knowledge of the theoretical foundations of the dynamics of development and fighting fires in petrochemical plants is required for senior units of the organization, as well as for low-level employees –chiefs of departments, technologists, craftsmen, operatives of chemical and petrochemical industries. Important parameters to determine the degree of fire hazard are the flashpoint, auto-ignition, temperature limits of ignition etc.

Adiabatic temperature of combustion involves the heat consumption to heat the products of combustion. But since the diffusion combustion is accompanied by heat exchange in the environment, the actual temperature that is developed during a fire, is usually 30-50% less than the theoretical one. So, the theoretical temperature of combustion of gasoline is equal to 1730 ^{0}C, and a fire tank with gasoline develops temperatures up to 1400 ^{0}C. The combustion of gasoline can be localized with finely sprayed water, foam or powder. However, extinction water may be undesirable, as the difference between the densities of water and gas can cause complications with the localization of fire. The most effective is the powder extinction.

Теоретическая часть. В статье [2] рассматриваются расчеты геометрических параметров порошковой струи по методу Н. И. Ульянова, подаваемой для тушения горения из лабораторной установки. Огнетушащий порошок соответствует составу, описанному в патенте [3]. Авторами данной статьи были рассчитаны: размер начального участка от распылителя лабораторной установки, расстояние от распылителя до полюса основного участка, а также определен тангенс половинного угла расширения на начальном участке порошковой струи.

Огнетушащий порошок с добавкой алюмо-калиевых квасцов обеспечивает снижение слеживаемости и увеличение текучести порошка. Термографический анализа алюмо-калиевых квасцов рассмотрен в работе [4], а кинетика разложения и термической диссоциации алюмокалиевых квасцов в составе огнетушащих порошков рассмотрена в работе [5].

Полная дегидратация алюмокалиевых квасцов осуществляется при температуре 350°С (рис.1) и далее протекает разложение сульфата алюминия по схеме:

$$K_2SO_4 \cdot Al_2(SO_4)_3 \rightarrow K_2SO_4 + Al_2O_3 + 3SO_2$$

Theoretical part. The paper [2] deals with the calculation of the geometric parameters of the powder jet by Ulyanova N.I. method supplied from laboratory setup to extinguish fire. Fire extinguishing powder corresponds to the composition described in the patent [3]. The authors have calculated the size of the initial portion of the atomizer from the laboratory setup, the distance from the atomizer to the main section pole and determined half-angle tangent of expansion in the initial section of the powder jet.

Fire extinguishing powder with an aluminum-potassium alum additive reduces caking and increasing the flow rate of the powder. Thermal analysis of aluminum-potassium alum is considered in [4], and the kinetics of decomposition and thermal dissociation of aluminum-potassium alum in the composition of the fire extinguishing powder is considered in [5].

Full dehydration of aluminum-potassium alum is carried out at a temperature of 350^0C (Fig.1) and further goes the decomposition of aluminum sulfate according to the scheme:

$$K_2SO_4 \cdot Al_2(SO_4)_3 \rightarrow K_2SO_4 + Al_2O_3 + 3SO_2$$

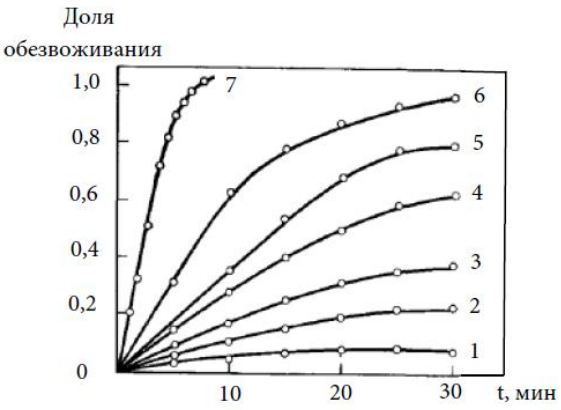

Рис.1. Кинетические кривые дегидратации алюмокалиевых квасцов при температуре, °С:
Fig.1. Kinetic curves of dehydration of aluminum-potassium alum at a temperature, °C:
1 – 40; 2 – 50; 3 – 60; 4 – 70; 5 -150; 6 – 200; 7 – 350.

При температуре 680–700°С кинетика скорости десульфуризации достигает максимального значения К=0,06 мин$^{-1}$ (рис. 2).

At a temperature of 680–700°C the kinetics rate of desulphurization reaches the maximum value K=0,06 min^{-1} (Fig. 2).

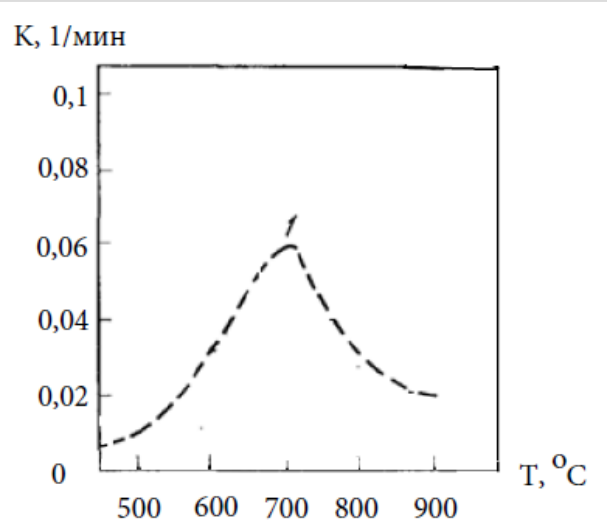

Рис. 2. Кинетическая кривая десульфуризации алюмокалиевых квасцов в инертной атмосфере

Fig. 2. The kinetic curve of desulphurization of aluminum-potassium alum in an inert atmosphere

Как видно из рис. 2, скорость десульфуризации начинает резко увеличиваться уже при температуре 600°С, достигая максимального значения при 700°С. Далее скорость десульфуризации алюмокалиевых квасцов сводится на убывание и полная десульфуризация достигается при температуре 900°С. Дальнейший разогрев системы приводит к незначительному (до 6%) образованию алюмината.

Выводы. На основании вышеописанного можно сделать заключение о том, что соответствующим подбором композитного состава огнетушащих порошков, можно добиться результатов получения универсальных систем, позволяющих тушить пожары различных классов.

As it can be seen in figure 2, the desulphurization rate begins to increase dramatically already at a temperature of 600°C, reaching a maximum value at 700°C.

The rate of desulfurization of aluminum-potassium alum is decreasing, and the complete desulfurization is achieved at a temperature of 900 °C. Subsequent heating of the system leads to a slight (6%) formation of aluminate.

Conclusions. Based on the above we can conclude that with the appropriate selection of the composition of the composite fire-extinguishing powders, you can achieve the results to obtain universal systems to extinguish fires of different classes.

Библиографический список

1. Хорохорин, А. Е. Стратегия развития современных нефтехимических комплексов, мировой опыт и возможности для России дис кандидата эконом. наук. /А. Е. Хорохорин. — Москва. 2015. — 178 с.

2. Адамян, В. Л. Геометрические параметры струи огнетушащего порошка на основе

References

1. Khorokhorin, E.A. Strategiya razvitiya sovremennykh neftekhimicheskikh kompleksov, mirovoy opyt i vozmozhnosti dlya Rossii dis…candidata ekonom. nauk. [Strategy of development of the modern petrochemical complexes, international experience and opportunities for Russia dis.... candidate of econ. Sciences.]. Moscow, 2015, 178 p. (in Russian).

2. Adamyan, L.V., Sergeeva, G.A., Goloborodko, B.Y. Geometricheskie parametry strui ognetushashchego poroshka na osnove

хлорида калия с добавками алюмокалиевых квасцов и оксида цинка / В. Л. Адамян, Г. А. Сергеева, Б. Ю. Голобородько // Перспективы науки. — 2017. — № 1. — С.9–13.

3. Огнетушащий порошковый состав : патент 2 615 715 Рос. Федерация С1 / В. Л. Адамян, Д. А. Бутко, Н. В. Благородова, Н. В. Кондратенко, Д. В. Тоцкий; заявл. 18.02.2016; опубл. 07.04.2017. Бюл. № 10.

4. Saeman W. C. – J. Metalls, 1966 , vol. 18, N 7, p.811 – 819.

5. Адамян, В. Л. Кинетика разложения и термической диссоциации алюмокалиевых квасцов в составе огнетушащих порошков / В. Л Адамян [и др.] // Перспективы науки. — 2016. — №10. — С.7–10.

khlorida kaliya s dobavkami alyumokalievykh kvasstov i oksida tsinka. [Geometrical parameters of the jet fire extinguishing powder based on potassium chloride with additives of aluminum potassium sulfates and zinc oxide.] Perspektivy nauki, 2017, no. 1, pp. 9-13 (in Russian).

3. Adamyan, V.L., Butko, D.A., Blagorodova, N.V., Kondratenko, N.V., Totskiy, D.V.Ognetushashchiy poroshkovy sostav. [Fire-extinguishing powder composition. Russian Federation.] Patent RF, no. 2 615 715, 2017 (in Russian).

4. Saeman W. C. J. Metalls, 1966 , vol. 18, no. 7, p.811 – 819.

5. Adamyan, L.V. et al. Kinetika razlozheniya i termicheskoy dissotsiyatsii alyumokalievykh kvastsov v sostave ognetushashchikh poroshkov. [Kinetics of decomposition and thermal dissociation of aluminum potassium sulfates in the composition of fire extinguishing powder.] Perspektivy nauki, 2016, no. 10, pp. 7-10 (in Russian).

Поступила в редакцию 26.04.2017
Сдана в редакцию 27.04.2017
Запланирована в номер 05.06.2017

Received 26.04.2017
Submitted 27.04.2017
Scheduled in the issue 05.06.2017

Адамян Владимир Лазаревич,
кандидат технических наук, доцент Донского государственного технического университета, (РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1)
Vla1345@yandex.ru

Ульмейкин Даниил Александрович,
магистрант Донского государственного технического университета,
(РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1)
777bigdan@mail.ru

Adamyan Vladimir Lazarevich,
Cand. of techn. Sciences/PnD, Associate professor, Don State Technical University (Gagarin sq., 1, Rostov-on-Don, Russian Federation)
Vla1345@yandex.ru

Ulmeykin Daniil Aleksandrovich,
Master's degree student of Don State Technical University (Gagarin sq., 1, Rostov-on-Don, Russian Federation)
777bigdan@mail.ru

УДК 628.312.5
DOI 10.23947/2541-9129-2017-3-23-32

АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИОННОГО ОБМЕНА С УЧЕТОМ СТЕПЕНИ ЗАГРЯЗНЕННОСТИ СТОЧНЫХ ВОД

***О. В. Дымникова*[1], *Д. А. Кривоблоцкая*[1], *Б. Дорждерем*[2]**

[1]Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация

Мюнхенский технический университет, Мюнхен, Бавария, Германия

dymoval@mail.ru
d.krivoblotskaya20@mail.ru
bolor.dorjderem@gmail.ru

Исследовано влияние различных параметров на эффективность процесса ионного обмена с целью повышения качества умягчения и обессоливания воды. Представлена зависимость процесса от длительности и разных показателей растворов при варьировании концентрации и природы растворенного вещества. На основании полученных результатов сделаны выводы о применимости ионного обмена для очищения воды.

Ключевые слова: ионный обмен, ионообменные смолы, обессоливание, сточная воды, электропроводность, эффективность.

Введение. Вода — ценнейший природный ресурс. Она играет исключительную роль, обеспечивая биологические потребности организмов, участвуя во всех механизмах и жизненных циклах нашей планеты. Водные ресурсы активно используются в различных сферах антропогенной деятельности для бытовых, промышленных и сельскохозяйственных нужд. Потребности в воде огромны и ежегодно увеличиваются. На земном шаре общие запасы воды достигают 1,5 млн км^3. Около 2% этого объема составляет пресная вода, а количество доступной для использования воды не превышает 0,003%.

UDC 628.312.5
DOI 10.23947/2541-9129-2017-3-23-32

ANALYSIS OF THE EFFICIENCY OF ION EXCHANGE, DEPENDING ON THE DEGREE OF WASTEWATER CONTAMINATION

***O. V. Dymnikova*[1], *D. A. Krivoblotskaya*[1], *B. Dorjderem*[2]**

[1]Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russian Federation

[2]Technical University of Munich, Bavaria, Germany

dymoval@mail.ru
d.krivoblotskaya20@mail.ru
bolor.dorjderem@gmail.ru

The article considers the influence of various parameters on the efficiency of ion exchange process to improve the quality of softening and desalination of water. It presents the dependence of the process on the duration and different characteristics of solutions by varying the concentration and nature of solute. On the basis of the results obtained the authors drawn a conclusion about the applicability of ion exchange for water purification.

Keywords: Ion exchange, ion exchange resins, desalination, sewage, electrical conductivity, efficiency.

Introduction. Water is a valuable natural resource. It plays a crucial role in ensuring the biological needs of organisms, participating in all mechanisms and life cycles on our planet. Water resources are widely used in various fields of human activities for domestic, industrial and agricultural needs. The demand for water is huge and it is growing. On the globe, the total water supply is up to 1.5 million km3. About 2% of this amount is fresh water, and the amount available for use does not exceed 0.003%.

Нехватка пресной воды все больше ощущается в 43 странах мира, составляющих около 60% всей поверхности суши. Проблемы с дефицитом пресной питьевой воды испытывают также в Крыму и южных регионах России.

В условиях растущего загрязнения воды и быстрого роста водопотребления «водный голод» приобретает все большую остроту. Существует мнение о том, что в итоге человечество окажется перед необходимостью добычи пресной воды из вод мирового океана. Основными компонентами в морской воде являются Na^+, Cl^-, K^+, Mg^{2+}, Ca^{2+}, Sr^{2+}, Br^-, F^-, H_3BO_3. Наиболее радикальным способом ликвидации дефицита пресной воды является опреснение соленых и солоноватых вод. Достигается это различными способами. Одним из таких способов является ионный обмен, который основан на удалении из воды неорганических веществ, ионов тяжелых металлов и других веществ. Сущность данного метода заключается в способности специальных материалов (ионитов) изменять в желаемом направлении ионный состав обрабатываемой воды. Эта технология позволяет добиться качества воды, соответствующего нормам различных промышленных энергетических объектов.

Постановка задачи. Целью данной работы являлось изучение эффективности умягчения и обессоливания воды на ионообменных смолах в зависимости от концентрации растворов, времени процесса и природы растворенных веществ.

Методика эксперимента.

Для исследования эффективности обессоливания воды на ионообменных смолах была проведена экспериментальная работа, состоящая из двух частей:

1 — определение степени обессоливания воды на ионообменных смолах в зависимости от начальной концентрации растворенных веществ, соотносимой с электропроводностью раствора до и после ионного обмена;

2 — определение эффективности ионного обмена в зависимости от времени процесса и

43 countries, which occupy about 60% of the land surface, experience the lack of fresh water more and more. The Crimea and southern regions of Russia also have shortages of fresh drinking water.

In the face of growing water pollution and the rapid growth of water consumption "water hunger" has become increasingly prominent. There is a belief that eventually humanity will face the necessity to extract fresh water from the oceans. The major components of seawater are Na^+, Cl^-, K^+, Mg^{2+}, Ca^{2+}, Sr^{2+}, Br^-, F^-, H_3BO_3. The most radical way to eliminate the shortage of fresh water is desalination of salt and brackish waters. This is achieved in various ways. One such method is ion exchange, which is based on the removal of inorganic substances, ions of heavy metals and other substances from water. The essence of this method lies in the ability of special materials (ion exchangers) to change the ion composition of the treated water in a desired way. This technology allows achieving the quality of water corresponding to norms of various industrial energy facilities.

Statement of the problem. The aim of this work is to study the efficiency of softening and desalination of water on ion-exchange resins depending on the solution concentration, process time and nature of the dissolved substances.

Experimental procedure.

To investigate the efficiency of water desalting on ion exchange resins the authors have carried out the experimental work, consisting of two parts:

1 — determination of the degree of desalination of water on ion-exchange resins depending on the initial concentration of the dissolved substances, which correlated with the conductivity of the solution before and after ion exchange;

2 — determination of the effectiveness of ion

природы растворенных веществ.

Предварительно приготовили растворы NH_4Cl, Na_2SO_4, NaCl, K_2SO_4, Na_2CO_3, $CaCO_3$, $MgSO_4$ с концентрациями 0,5%, 1,0%, 1,5%, 2,0% и измерили начальную электропроводность каждого из них до процесса обессоливания. Результаты электропроводности растворов до эксперимента приведены в таблице 1.

exchange depending on time and nature of the dissolved substances.

The authors have pre-prepared solutions of NH_4Cl, Na_2SO_4, NaCl, K_2SO4, Na_2CO_3, $CaCO_3$, $MgSO_4$ with the concentrations 0,5%, 1,0%, 1,5%, 2,0% and measured the initial conductivity of each of them before the desalination process. The results of the electrical conductivity of the solutions before the experiment are given in table 1.

Таблица 1
Table 1

Начальная электропроводность всех исследуемых растворов
The initial conductivity of all the studied solutions

Концентрация, % *Concentration, %*	**Начальная электропроводность, мСм** *Initial conductivity, mS*						
	NH_4Cl	**Na_2SO_4**	**NaCl**	**K_2SO_4**	**Na_2CO_3**	**$CaCO_3$**	**$MgSO_4$**
0,5	9,96	5,20	7,01	6,47	8,15	1,88	2,79
1,0	7,01	8,06	–	_	_	2,25	4,66
1,5	6,47	10,75	_	_	_	1,5	6,53
2,0	8,15	–	_	_	_	4,21	7,77

Для получения наилучшего результата авторами были проведены экспериментальные исследования, позволившие определить оптимальные значения и соотношения массы ионитов и растворов, что составило — 30г ионита и 10г исследуемого раствора. Эксперимент проводили с каждым веществом по 10, 15, 20 и 25 минут, измеряя при этом электропроводность после каждого опыта. Полученные значения изменения электропроводности, в зависимости от времени ионного обмена, приведены в таблице 2.

To get the best result, the authors have carried out experimental researches, which made it possible to determine the optimal values and ratios of resins and solutions, which amounted to 30 g of the resin and 10g of the investigated solution. The experiment was carried out with each substance for 10, 15, 20 and 25 minutes, and the conductivity after each experiment was measured. The obtained values of changes of electrical conductivity, depending on the time of ion exchange are shown in table 2.

Таблица 2
Table 2

Изменение значений электропроводности в зависимости от времени ионного обмена

The change of conductivity values depending on the time of ion exchange

Концентрация растворов, % *Concentration of solutions, %*	**Электропроводность, мСм / *Electrical conductivity, mS***						
	NH_4Cl	**Na_2SO_4**	**NaCl**	**K_2SO_4**	**Na_2CO_3**	**$CaCO_3$**	**$MgSO_4$**
Время t=10 минут / *Time t=10 minutes*							
0,5	4,06	2,52	2,28	4,15	2,45	0,53	2,21
1,0	–	–			4,53	1,07	6,57
1,5	–	–			5,02	3,23	4,67
2,0	–	–			–	3,89	6,61
Концентрация растворов, % *Concentration of solutions, %*	**Электропроводность, мСм / *Electrical conductivity, mS***						
	NH_4Cl	**Na_2SO_4**	**NaCl**	**K_2SO_4**	**Na_2CO_3**	**$CaCO_3$**	**$MgSO_4$**
Время t=15 минут / *Time t=15 minutes*							
0,5	2,81	2,02	1,69	3,16	1,93	0,37	1,67
1,0	–	–	–	–	3,96	0,76	2,08
1,5	–	–	–	–	4,41	2,54	3,23
2,0	–	–	–	–	–	3,23	5,76
Время t=20 минут / *Time t=20 minutes*							
0,5	1,52	1,67	0,84	1,82	1,51	0,22	1,05
1,0	–	–	–	–	2,52	0,54	1,34
1,5	–	–	–	–	3,95	1,87	2,56
2,0	–	–	–	–		2,56	3,25
Время t=25 минут / *Time t=25 minutes*							
0,5	0,23	0,53	0,62	0,36	0,77	0,18	0,12
1,0	–	–	–	–	1,07	0,35	0,68
1,5	–	–	–	–	3,25	1,06	1,25

2,0	–	–	–	–	–	1,68	1,66

Для получения максимально эффективного результата от ионного обмена, в соответствии с таблицей 2, рассмотрены диапазоны времени (при С=0,5%) при которых значения электропроводности минимальны $E(CaCO_3)$=0,18мСм, $E(MgSO_4)$=0,12 мСм.

На основании полученных данных построили зависимость электропроводности от концентрации растворов и времени фильтрования (рис. 1 и 2).

To obtain the most effective result from ion exchange, in accordance with table 2, the authors have considered the ranges of time (at C=0,5%) at which the electrical conductivity values are minimal $E(CaCO_3)$=0,18 mS, $E(MgSO_4)$=0,12 mS.

Based on these data, they have constructed the dependence of the electrical conductivity on the solution concentration and time of filtration (Fig. 1 and 2).

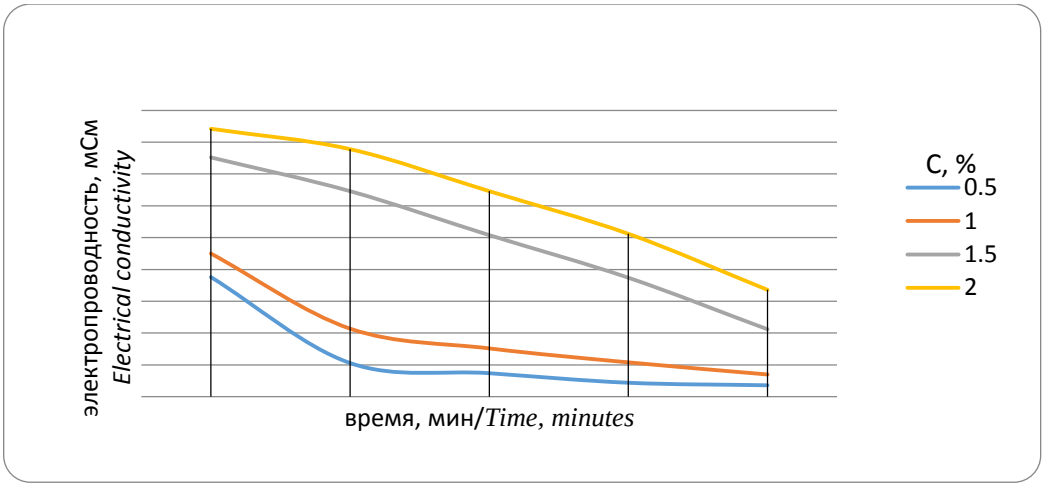

Рис. 1. Зависимость электропроводности раствора $CaCO_3$ от концентрации и времени фильтрации в ионообменных смолах: С — концентрация раствора, %

Fig. 1. The dependence of the electrical conductivity of the solution $CaCO_3$ on the concentration and time of filtration in ion exchange resins: C — concentration of the solution, %

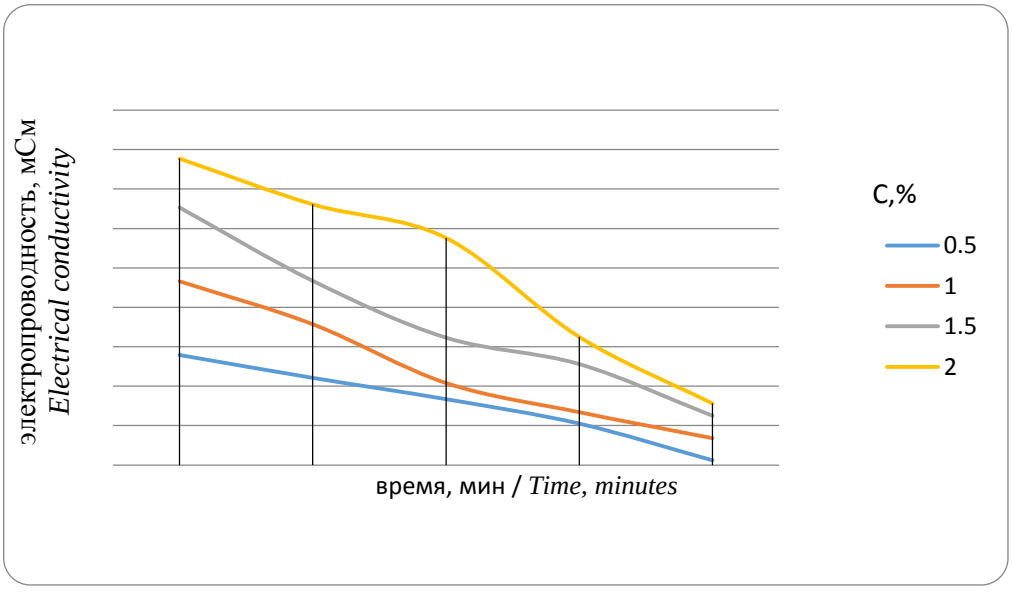

Рис. 2. Зависимость электропроводности $MgSO_4$ от концентрации и времени фильтрации в ионообменных смолах: С — концентрация раствора, %

Fig. 2. The dependence of MgSO4 conductivity on the concentration and time of filtration in ion

exchange resins: C — concentration of the solution, %

На обоих графиках видно, что при концентрации вещества в растворе 0,5% электропроводность минимальна. Однако, большее снижение концентрации отмечено для высококонцентрированных растворов, а, следовательно, ионный обмен протекает более эффективно.

Для определения влияния природы растворенного вещества на эффективность ионного обмена с различной валентностью и размерами молекул построили график зависимости изменения показаний электропроводности от природы вещества (рис. 3). Для всех нижеуказанных веществ концентрация составляла 0,5%, а время фильтрации 25 минут. Определены значения электропроводности растворов до и после эксперимента (таблица 3).

Both graphs show that at the concentration of the substance in 0,5% solution the electrical conductivity is minimal. However, a larger decrease in concentration was observed for highly concentrated solutions, and, consequently, ion exchange takes place more efficiently.

To determine the effect of solute nature on the efficiency of ion exchange of different valence and size of the molecules the authors have built a graph of dependence of readings change of electrical conductivity on the nature of the substance (Fig. 3). For all of the following substances, the concentration was 0,5%, and the filtration time was 25 minutes. The values of electrical conductivity of the solutions before and after the experiment were determined (Table 3).

Таблица 3
Table 3

Изменение значений электропроводности в зависимости от природы растворенного вещества
The change of conductivity values depending on the solute nature

Вещество *Substance*	Na_2CO_3	Na_2SO_4	NaCl	K_2SO_4	$MgSO_4$	$CaCO_3$	NH_4Cl
Начальное значение электропроводности, мСм *The initial value of the electrical conductivity, mS*	5,2	7,01	6,47	8,15	2,79	1,88	9,96
Электропроводность после введения катионита и анионита, мСм *The conductivity after the introduction of cation exchange resin and anion exchange resin, mS*	0,77	0,53	1,46	0,36	0,12	0,18	0,23

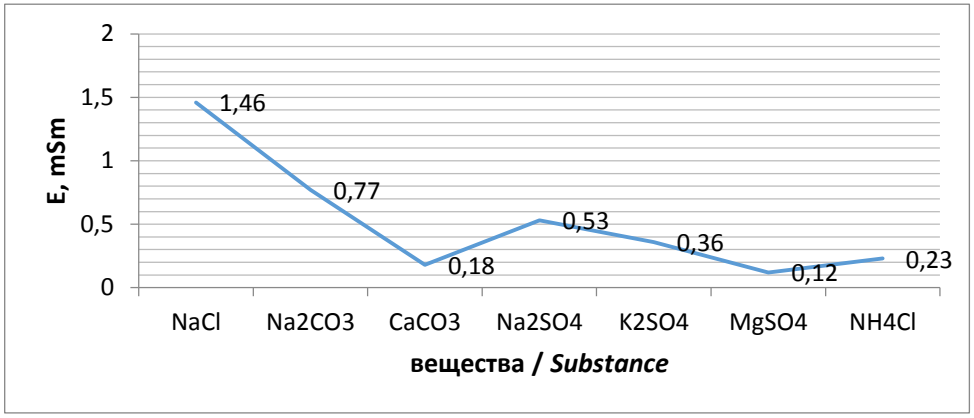

Рис. 3. Зависимость электропроводности обессоленного раствора от природы вещества

Fig. 3. The dependence of the conductivity of a desalted solution on the nature of the substance

Однако, необходимо учитывать, что начальные электропроводности растворов до процесса ионного обмена, как и после обессоливания были различны. С целью возможности сопоставления приведенных результатов ввели коэффициент эффективности А, который равен отношению начального значения электропроводности к конечному:

$$A = 1 - \frac{E}{E_0}, \qquad (1)$$

где Е — электропроводность после катионита и ионита, E_0 — начальное значение электропроводности, мСм.

Тогда получим следующий вид графика зависимости коэффициента эффективности от природы вещества (рис. 4).

However, it is necessary to consider that the initial conductivity of the solutions before ion exchange and after desalination was different. To compare the results the authors have introduced the efficiency factor A, which is equal to the ratio of the initial value of the electrical conductivity to the final value:

$$A = 1 - \frac{E}{E_0}, \qquad (1)$$

where E is the electrical conductivity after cation exchange resin and anion exchange resin, E_0 — the initial value of conductivity, mS.

We obtain the following graph of the dependence of the efficiency factor on the nature of the substance (Fig. 4).

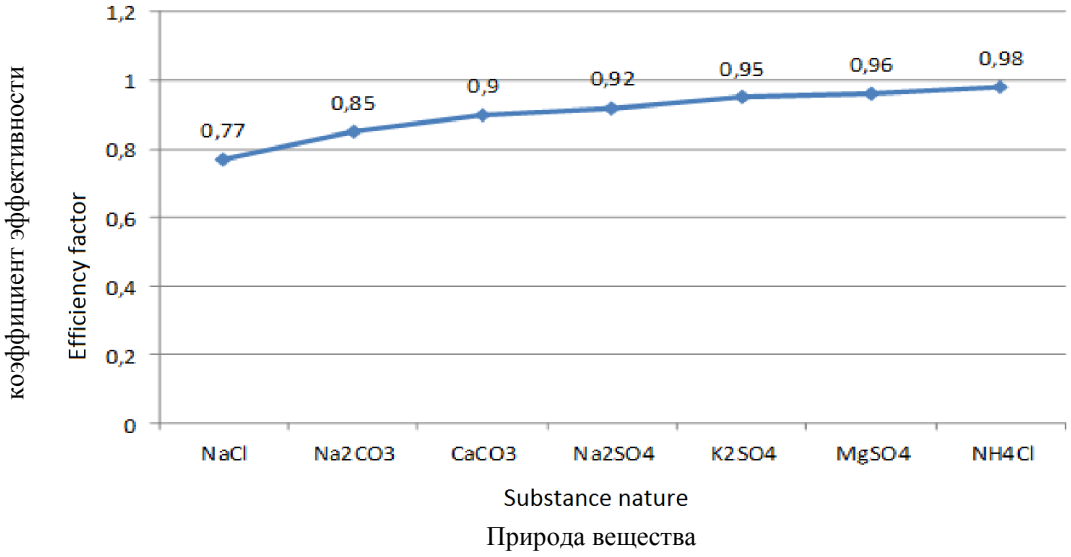

Рис. 4. Зависимость коэффициента эффективности от природы вещества.

Fig. 4. The dependence of the efficiency factor on the nature of the substance.

На оси Y отмечены значения коэффициента эффективности, определенные по формуле (1), на оси X — водные растворы, содержащие вещества с различной валентностью и размерами молекул.

Выводы.

1. При обмене на сильнокислотном сульфокатионите однозарядных и двузарядных ионов установлен следующий ряд селективности:

$$Na^+ < Ca^{2+} < K^+ < Mg^{2+} < NH_4^+$$

Для катионов, имеющих одинаковый заряд, ряды селективности имеют следующий вид:

$$H^+<Na<K^+<NH_4^+,$$
$$Mg^{2+}<Ca^{2+}$$

Это доказывает следующие утверждения:

– двузарядные ионы более селективны, чем однозарядные ионы;

– с увеличением размеров ионов, то есть с уменьшением энергии гидратации, избирательность сульфокатионита к катионам возрастает.

Исключениями в данной цепочке являются K^+ и Mg^{2+} , которые связаны с кислотным остатком SO_4^{2-} сильной кислоты. А сильные электролиты диссоциируют быстрее, чем слабые и, кроме того, полностью.

2. При обмене на высокоосновном аниоците, содержащем четвертичные аммониевые группы, для анионов установлен следующий ряд селективности:

$$Cl^- <CH_3COO^- < CO_3^{2-} < SO_4^{2-}$$

Это доказывает следующие утверждения:

– анионы крупных размеров в бóльшей степени нарушают структуру воды, чем анионы меньшего размера. Выгоднее их переход в фазу смолы, где структура воды менее упорядочена. Поэтому при одинаковом заряде анионы меньшего размера вытесняются из ионита анионами большего размера.

– с увеличением заряда и размера аниона (массы и радиуса молекул) увеличивается селективность анионита.

The values of the efficiency factor defined by the formula (1) are marked on the Y-axis, on the X-axis — aqueous solutions containing substances with different valence and size of the molecules.

Conclusions.

1. During the exchange on a strongly acidic sulphocationite one-valent and divalent ions the following range of selectivity was established:

$$Na^+ < Ca^{2+} < K^+ < Mg^{2+} < NH_4^+$$

For cation exchange resins with the same charge, ranges of selectivity are as follows:

$$H^+<Na<K^+<NH_4^+,$$
$$Mg^{2+}<Ca^{2+}$$

This proves the following statement:

– divalent ions are more selective than one-valent ions;

– with the increase in size of the ions, i.e. with the decrease of hydration energy, the selectivity of sulphocationite to cations increases.

Exceptions in the chain are K^+ and Mg^{2+} that are bonded with the acid residue SO_4^{2-} strong acid. Strong electrolytes dissociate faster than the weak ones and, in addition, they do it completely.

2. With the highly basic anion exchanger containing quaternary ammonium groups, the following range of selectivity is established for anion exchange resins:

$$Cl^- <CH_3COO^- < CO_3^{2-} < SO_4^{2-}$$

This proves the following statement:

– anion exchange resins of large size disrupt the structure of water more than anion exchange resins of smaller size. The passage to the phase of resin is more efficient, where the structure of water is less ordered. Therefore, for the same charge, the smaller anions are displaced from the ion exchanger with anions of larger size.

– with the increasing charge and size of the anion (the mass and radius of the molecules) increases the selectivity of the anion exchanger.

Заключение. Обработка воды с помощью ионного обмена принципиально отличается от обработки воды другими методами тем, что удаляемые из нее примеси не образуют осадка, требующего постоянного удаления. Кроме того, такая обработка не требует непрерывного дозирования реагентов. Следовательно, эксплуатация установок, работающих по методу ионного обмена, значительно проще, габариты аппаратов меньше, а эффект обработки выше, чем у других установок.

Таким образом, большинство компонентов, содержащихся в морской воде, можно удалить с помощью ионного обмена достаточно эффективно, не прибегая к большим затратам. То есть океанские и морские воды могут стать ценным источником водных ресурсов для промышленного использования, так как их огромные запасы практически неисчерпаемы.

Библиографический список.

1. Новикова, М. А. Методы физико-химической очистки сточных вод / М. А. Новикова, А. С. Печуляк, О. Н. Романова // Фундаментальные и прикладные исследования в современном мире. — 2014. — № 7. — С.83–86.

2. Ларионов, Н. М. Промышленная экология: учебник для бакалавров / Н. М. Ларионов, А. С. Рябышенков. — Москва : Юрайт, 2012. — 495с.

3. Новиков, А. В. Улучшение качества природных и очистка сточных вод: учебное пособие. ч. 1. / А. В. Новиков, Ю. Н. Женихов. — Тверь: Изд-во ТГТУ, 2006. — 112с.

4. Дягилева, А. Б. Промышленная экология : учебное пособие. / А. Б. Дягилева, А. В. Лоренцсон; под ред. Ю. М. Чернобережского. — Санкт-Петербург : Изд-во СПбГТУРП,2012. — ч. 2. — 109с.

5. Куртукова, Л. В. Создание экоэффективной технологии умягчения природных вод с использованием новых типов материалов / Л. В. Куртукова, В. А. Сомин, Л. Ф Комарова // Ползуновский вестник. — 2012. —

Conclusion. Water treatment using ion exchange is fundamentally different from other water treatment techniques in the fact that the removed from it impurities do not form sludge that requires constant removal. In addition, this treatment does not require continuous reagent dosing. Consequently, the operation of installations operating by the method of ion exchange is much easier, the size of the apparatus is smaller, and the effect of treatment is higher than in other plants.

Thus, most of the components of seawater can be removed using ion exchange effectively, without high costs. That is ocean water and seawater can be valuable sources of water for industrial use, as their huge reserves are practically inexhaustible.

References.

1. Novikova, M.A., Pechulyak, A.S., Romanova, N.O. Metody fiziko-khimicheskoy ochistki stochnykh vod. [Methods of physical-chemical wastewater treatment.] Fundamental’nye i prikladnye issledovaniya v sovremennom mire, 2014, no. 7, pp. 83–86 (in Russian).

2. Larionov, N.M., Ryabyshenkov, A.S. Promyshlennaya ekologiya: uchebnik dlya bakalavrov. [Industrial ecology: textbook for bachelors.] Moscow, Yurayt, 2012, 495 p. (in Russian).

3. Novikov, A.V., Zhenikhov, Y.N. Uluchenie kachestva prirodnykh i ochistka stochnykh vod: uchebnoe posobie. ch.1. [Improving the quality of natural and wastewater treatment: training manual. part 1.] Tver, Izdatel’stvo TGTU, 2006, 112 p. (in Russian).

4. Dyagileva, A.B., Lorentsson, A.V., ed. by Chernoberezhskiy Y.M. Promyshlennaya ekologiya: uchebnoe posobie. [Industrial ecology: training manual.] Saint Petersburg, Izdatel’stvo SPbGTURP, 2012, part 2, 109 p. (in Russian).

5. Kurtukova, L.V., Somin, V.A., Komarova, L.F. Sozdanie ekoeffektivnoy tekhnologii umyagcheniya prirodnykh vod s ispol’zovaniem novykh tipov materialov. [Creation of eco-efficient technology of softening of natural waters with the use of new types of materials.]

№ 3–1. — С.217–219.

6. Кучерик, Г. В. Исследование процессов умягчения при деминерализации шахтных вод на аниените АВ–17–8 / Г. В. Кучерик, Ю. А. Омельчук, Н. Д. Гомеля // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. — 2013. — Т.2/11, № 62. — С.35–38.

Polzunovskiy vestnik, 2012, no. 3-1, pp. 217–219 (in Russian).

6. Kucherik, G.V., Omelchuk, Y.A., Gomelya, N.D. Issledovanie protsessov umyagcheniya pri demineralizatsii shakhtnykh vod na anionite AB–17–8. [Study of the processes of softening during demineralization of mine waters by anion exchanger AB–17–8.] Vostochno-Evropeyskiy zhurnal peredovykh tekhnologiy, 2013, vol. 2/11, no. 62, pp. 35–38 (in Russian).

Поступила в редакцию 05.05.2017
Сдана в редакцию 05.05.2017
Запланирована в номер 05.06.2017

Received 05.05.2017
Submitted 05.05.2017
Scheduled in the issue 05.06.2017

Дымникова Ольга Валентиновна,
кандидат технических наук, доцент кафедры «Безопасность жизнедеятельности и защита окружающей среды» Донского государственного технического университета
(РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина,1)
DymOVal.mail.ru

Кривоблоцкая Дарья Александровна,
магистрант Донского государственного технического университета
(РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1)
d.krivoblotskaya20@mail.ru

Дорждерем Болор,
Магистрант Мюнхенского технического университета, (Мюнхен, Бавария, Германия)
bolor.dorjderem@gmail.ru

Dymnikova Olga Valentinovna,
Candidate of technical Sciences, Associate Professor of Department of life Safety and environmental protection of the Don State Technical University (Gagarin sq., 1, Rostov-on-Don, Russian Federation)
DymOVal.mail.ru

Krivoblotskaya Darya Alexandrovna,
Master student, Don State Technical University (Gagarin sq., 1, Rostov-on-Don, Russian Federation).
d.krivoblotskaya20@mail.ru

Dorjderem Bolor,
Master student, Technical University of Munich (Bavaria, Germany)
bolor.dorjderem@gmail.ru

УДК 504.062.2
DOI 10.23947/2541-9129-2017-3-33-46

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ И КОЛИЧЕСТВЕННАЯ ОЦЕНКА АВАРИЙНЫХ РАЗЛИВОВ НЕФТЕПРОДУКТОВ ПРИ ОСУЩЕСТВЛЕНИИ ПЕРЕГРУЗОЧНОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ НА АКВАТОРИИ

В. В. Озерянская, Р. Р. Лазуренко, А. Р. Данилова, Е. В. Лакуш

Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация

bommvoz@mail.ru
lirtokas@mail.ru
ms.anastasiya1994@mail.ru
Elizaveta-sergeevna94@mail.ru

Выполнено прогнозирование вероятных сценариев возникновения аварийных разливов нефтепродуктов при осуществлении перегрузочной деятельности на акватории. Рассмотрены основные причины возможных аварий, к которым относятся различные виды повреждения узловых компонентов переливного оборудования при проведении погрузочно-разгрузочных операций между судами. Выполнены расчёты объёмов и масс аварийных разливов дизельного топлива, вакуумного газойля и мазута в зависимости от условий возникновения аварий. Отмечена практическая значимость работы, указаны области применения полученных результатов.

Ключевые слова: нефтепродукты, аварийный разлив, прогнозирование, количественная оценка

Введение. Современный мир трудно представить без масел и топлива, бытовой химии, медицинских препаратов, одежды и обуви, современных дорожных покрытий. Эти и другие блага цивилизации в значительной степени являются результатом преобразования нефтепродуктов [1, 2]. Нефтепродукты — это смеси углеводородов, а также индивидуальные химические соединения, получаемые из нефти и

UDC 504.062.2
DOI 10.23947/2541-9129-2017-3-35-46

FORECASTING AND QUANTITATIVE ASSESSMENT OF ACCIDENTAL OIL SPILLS IN TRANSSHIPMENT ACTIVITIES ON THE WATER

V. V. Ozeryanskaya, R. R. Lazurenko, A. R Danilova., E. V. Lakush

Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russian Federation

bommvoz@mail.ru
lirtokas@mail.ru
ms.anastasiya1994@mail.ru
Elizaveta-sergeevna94@mail.ru

The article presents the performed forecast of probable scenarios of accidental oil spills in transshipment activities on the water. It considers the main causes of possible accidents, which include various types of damage to nodal components of transshipment equipment during loading-unloading operations between ships. The authors have carried out the calculations of volumes and masses of accidental spills of diesel fuel, gasoil and fuel oil depending on the conditions of occurrence of accidents. The practical significance of the work, along with the scopes of the results obtained is discussed.

Keywords: petroleum products, accidental spill, forecasting, quantitative assessment

Introduction. The modern world is inconceivable without oil and fuel, household chemicals, medicines, clothes and shoes, modern road surfaces. These and other benefits of civilization are largely the result of petroleum products processing [1, 2]. Petroleum is a mixture of hydrocarbons, as well as individual chemical compounds derived from

нефтяных газов. К нефтепродуктам относятся различные виды топлива (бензин, керосин, дизельное топливо, мазут, вакуумный газойль и др.), смазочные материалы, электроизоляционные среды, растворители и др. [1].

Очевидно, что добыча нефти играет важную роль в мировом развитии. Однако нефть и продукты её переработки в случае поступления в окружающую среду становятся опасными для человека, растительного и животного мира [3, 4].

Аварийные разливы нефти и нефтепродуктов, периодически возникающие на объектах нефтедобычи и нефтепереработки, а также при транспортировке нефтепродуктов, часто являются причинами серьёзных экологических катастроф, которые наносят значительный вред природным экосистемам, приводят к негативным экономическим и социальным последствиям [1, 4].

В настоящее время, в связи с изменившейся за последние годы политической ситуацией, морские порты черноморского побережья России получили новый мощный толчок к интенсивному развитию, которое проявилось, в том числе, в резком росте грузооборота нефти и нефтепродуктов. Это, в свою очередь, привело к увеличению частоты и вероятности возникновения чрезвычайных ситуаций, связанных с аварийными проливами нефти и нефтепродуктов на водную поверхность и негативным воздействием таких разливов на окружающую среду [1, 3, 5]. Возможные экологические последствия при этом носят трудно учитываемый характер, поскольку нефтяное загрязнение нарушает многие естественные процессы и взаимосвязи в водной среде [3, 6]. Для организации эффективной и быстрой ликвидации морских нефтяных разливов и защиты от них прибрежных территорий чрезвычайно важно заблаговременно прогнозировать вероятность возникновения аварийных ситуаций в местах осуществления интенсивной перегрузки нефтепродуктов, а также выполнять

petroleum and petroleum gases. Oil products include various types of fuel (gasoline, kerosene, diesel fuel, fuel oil, vacuum gas oil, etc.), lubricants, electrical environments, solvents etc. [1].

It is obvious that oil production plays an important role in the world development. However, oil and products of its processing if enter the environment are dangerous to human, plant and animal life [3, 4]. Accidental spills of oil and oil products that could occur at oil production facilities and refineries, and in transportation of oil products, are often the causes of serious environmental disasters, which cause significant harm to natural ecosystems, lead to negative economic and social consequences [1, 4].

Currently, due to the changed in recent years political situation, the seaports of the Black sea coast of Russia have received a powerful new impetus to intensive development, which appeared, in particular, in the sharp increase of turnover of oil and oil products. This, in turn, has led to an increase in the frequency and probability of occurrence of emergencies connected with accidental spills of oil and oil products on water surface and the negative impact of such spills on the environment [1, 3, 5]. Potential environmental impacts in this case are difficult to estimate as oil pollution violates many of the natural processes and interrelationships in the aquatic environment [3, 6]. For effective and rapid elimination of marine oil spills and protection of the coastal areas it is extremely important to predict in advance the probability of occurrence of emergency situations in places of intensive transshipment of oil products, and to perform a quantitative assessment of potential negative

количественную оценку масштабов возможных негативных воздействий.

Прогнозируемые аварийные ситуации. Одними из наиболее распространённых нефтепродуктов, перегрузка которых производится в местах расположения рейдовых перегрузочных районов на акваториях морских портов черноморского побережья России, являются различные виды топлива, в том числе вакуумный газойль, мазут, дизельное топливо. Перегрузка топлива на акваториях производится, как правило, по варианту «борт — борт» через судно-накопитель с использованием судов-привозчиков и судов-отвозчиков, которыми служат специализированные нефтеналивные суда (нефтяные танкеры) с двойным корпусом и грузовыми танками различной вместимости, расположенными параллельно по обоим бортам судна [7, 8]. Перегрузка нефтепродуктов с судна на судно осуществляется в автоматическом режиме закрытым способом с использованием насосного оборудования, грузовых трубопроводов, гибких шлангов, оборудованных фланцами, заглушками и т. п. [7, 8]. Применяемые технологии перегрузки позволяют предполагать, что возникновение разливов нефтепродуктов на акватории может произойти вследствие утечки нефтегруза в результате нижеперечисленных аварийных ситуаций, обусловленных, в том числе, различными видами повреждения переливного оборудования:

1) малое повреждение перегрузочного шланга;

2) перелив (переполнение) грузового танка судна при погрузке;

3) частичный разрыв перегрузочного шланга;

4) полный разрыв перегрузочного шланга;

5) повреждение борта или днища грузового танка судна;

6) повреждение двух смежных грузовых танков в результате перелома судна (так называемый нормативный разлив с 50% опорожнением танков [9]).

Количественная оценка объёмов и масс нефтепродуктов, которые могут поступить в

impacts.

Predictable emergencies. Among the most common petroleum products, transshipment of which is produced in the roadstead transshipment areas of seaports of the Black sea coast of Russia there are different types of fuel, including vacuum gas oil, fuel oil, diesel fuel. Transshipment on the water is made, as a rule "Board to Board" through the ship drive with the use of ships that come and go, which are special tankers (oil tankers) with double hull and cargo tanks of different sizes, arranged in parallel on the both sides of the vessel [7, 8]. Transshipment of petroleum products from vessel to vessel is carried out automatically by a closed method using pumping equipment, cargo pipes, and flexible hoses equipped with flanges, plugs, etc. [7, 8]. The applied technology suggests that the occurrence of oil spills in the waters can occur due to leakage of oil cargo as a result of the following emergency situations, including different types of damage to the equipment:

1) small damage to a handling hose;

2) overflow of the cargo tank of the vessel during loading;

3) partial tear of a handling hose;

4) complete tear of a handling hose;

5) damage to the board or the bottom of a cargo tank of a vessel;

6) damage to the two adjacent cargo tanks as a result of the fracture of the vessel (so-called regulatory spill with 50% emptying of the tanks [9]).

Quantitative assessment of the volume and mass of oil that can enter the waters as a result

акваторию вследствие реализации прогнозируемых сценариев аварийных ситуаций, выполнялась в соответствии с рекомендациями [9–13].

Утечка нефтегруза в результате малого повреждения перегрузочного шланга. В случае образования малого повреждения перегрузочного шланга (сквозной свищ, трещина, неплотность фланцевого соединения) расход нефтепродукта через аварийное отверстие составит:

$$Q = \mu \cdot \frac{\pi \cdot d_{эк}^2}{4} \sqrt{2 \cdot g \cdot H}, \qquad (1)$$

где $d_{эк}$ — эквивалентный диаметр аварийного отверстия; $d_{эк}$ = 25 мм — один из основных размеров, принимаемых при прогнозировании аварий ёмкостного оборудования; μ — коэффициент истечения, определяемый вязкостью перекачиваемой жидкости, причем для принятого размера аварийного отверстия $d_{эк}$, видов жидкостей (дизельное топливо, вакуумный газойль, мазут) и режимов истечения (критерий *Re*) величина μ составляет 0,73–0,78; g = 9,81 м/с^2 — ускорение свободного падения; H — напор, обусловленный давлением P в аварийном сечении, м; фактические значения P для типового насосного оборудования нефтяных танкеров составляют 2–3 кг/см^2, следовательно H = 20–30 м.

Объём разлива:

$$V = 60 \cdot Q \cdot t, \qquad (2)$$

где t — время остановки перекачки; в соответствии с [13] расчётное время отключения трубопроводов при отсутствии резервирования элементов управления составляет 120 с, при ручном управлении отключения трубопроводов — 300 с. В настоящем расчёте принято t = 120 с.

Таким образом, максимальный объём разлива нефтепродуктов в результате малого повреждения перегрузочного шланга, рассчитанный по формулам (1)–(2), составляет V = 1,1 м^3.

Плотность нефтепродуктов при 15 °С равна: мазут (марка М-100) — 994,2 кг/м^3; дизельное топливо (по ГОСТ 305–82) — 831,1 кг/м^3; вакуумный газойль (марки А и Б) — 920,6 кг/м^3

of the predicted emergency scenario was carried out in accordance with the recommendations [9-13].

Leakage of oil cargo in the result of a small damage to the handling hose. In case of small damage to the handling hose (through a hole, crack, loose flange connection) flow rate of oil through the escape hole will be:

$$Q = \mu \cdot \frac{\pi \cdot d_{эк}^2}{4} \sqrt{2 \cdot g \cdot H}, \qquad (1)$$

where *d*эк — the diameter equivalent to the accident hole; *d*эк = 25 mm — one of the main dimensions adopted in the prediction of tanks accidents; μ — the coefficient of discharge, determined by the viscosity of the fluid, and for the accepted size of the accident hole *d*эк, kinds of liquids (diesel fuel, vacuum gasoil, fuel oil) and flow rates (criterion *Re*), the value of μ is 0,73–0,78; g = 9,81 m/s2 — free fall acceleration; H is the head flow determined by the pressure P in the emergency section, m; the actual values of R for standard pumping equipment of oil tankers are 2-3 kg/cm2, and therefore, H = 20-30 m

The volume of the spill:

$$V = 60 \cdot Q \cdot t, \qquad (2)$$

where t is the stopping time of the transshipment; in accordance with [13] the estimated time to shutdown pipelines with no redundancy of controls is 120 s, for manual control the shutdown — 300 s. In this calculation it is accepted that t = 120 s.

Thus, the maximum volume of oil spill in the result of a small damage to a handling hose, calculated according to the formulas (1)–(2) is V = 1,1 m^3.

The density of oil at 15 ° C is for fuel oil (M-100) — 994,2 kg/m^3; diesel fuel (GOST 305-82) — 831,1 kg/m^3; vacuum gas oil (grade A

[14]. Следовательно, масса разлившихся нефтепродуктов при рассчитанном объёме 1,1 м^3 составляет: мазут — 1,09 т; дизельное топливо — 0,91 т; вакуумный газойль — 1,01 т.

Утечка нефтегруза в результате перелива (переполнения) грузового танка судна при погрузке. При выполнении погрузочно-разгрузочных операций существует опасность возникновения перелива (переполнения) грузовых танков в результате ошибочных действий (бездействия) персонала и/или отказа технических средств. Определение количественных параметров разлива в результате подобной аварии основано на оценке сверхнормативного времени погрузки танка, когда после заполнения его полного (100%) объёма, происходит поступление нефтегруза на палубу загружаемого судна и, в дальнейшем, в акваторию.

Величина подачи грузовых насосов судна, осуществляющего погрузку, в завершающей части погрузки составляет Q = 600 м^3/ч (0,167 м^3/с) [8], а сверхнормативное время погрузки до её остановки — t = 300 с [13]. При этом на палубу загружаемого судна поступит до 50 м^3 нефтепродуктов, половина которых может быть удержана конструкцией палубы, а половина, т. е. около 25 м^3, попадёт за борт в акваторию [7]. С учётом плотности нефтепродуктов [14], их масса при данном объёме составит: дизельное топливо — 20,8 т; вакуумный газойль — 23 т; мазут — 24,8 т.

Утечка нефтегруза в результате частичного разрыва перегрузочного шланга. В этом случае объём прогнозируемого разлива, определённый по формуле (2) при максимальной подаче грузового насоса Q = 3500 м^3/ч [8], составит V = 292 м^3. При этом учтено возникновение дополнительной нештатной ситуации, когда наряду с разрывом перегрузочного шланга произошёл отказ аппаратуры отключения трубопровода и потребовался переход на ручное управление, поэтому время остановки перекачки (t в формуле (2)) принято равным 300 с [13]. Весь

and B) — 920,6 kg/m^3 [14]. Consequently, the mass of the spilled oil with a calculated volume of 1,1 m^3 is for oil — 1,09 t; diesel fuel — 0,91 t; vacuum gas oil — 1,01 t

Leakage of oil cargo in the result of overflow of the cargo tank of the vessel during transshipment. In loading and unloading operations, there is a risk of overflow of the cargo tanks in the result of erroneous actions (omissions) of staff and/or failure of technical equipment. Determination of quantitative parameters of the spill as a result of this accident is based on the estimate of the excess time of tank loading, when after filling it to full volume (100%), there is a flow of oil cargo on the deck of the vessel and, further, into the waters.

The rate of the cargo pumps of the vessel is responsible for loading, in the final part of the loading it is Q = 600 m^3/h (0,167 m^3/s) [8], and excessive loading time to stop is t = 300 [13]. At this up to 50 m^3 of petroleum products will go to deck of the vessel, half of which may be retained by the construction of the deck, and the other half, i.e., about 25 m^3, will fall overboard into the waters [7]. Taking into account the density of petroleum products [14], its mass for a given volume will be for diesel fuel — 20,8 t; vacuum gas oil is 23 tons; fuel oil — 24,8 t

Leakage of oil cargo in the result of partial tear of a handling hose. In this case, the projected spill volume calculated by the formula (2) with a maximum flow of the pump Q = 3500 m^3/h [8], will be V = 292 m^3. This include additional non-standard situation, when along with a gap in a handling hose, the pipeline shutdown equipment failed and there was the need to switch to manual control, so the stop time of pumping (t in the formula (2)) was equal to 300 [13]. The entire loss of oil cargo in

объём утечки нефтегруза при подобном аварийном сценарии может поступить в морскую среду. С учётом плотности разлившихся нефтепродуктов [14], их масса при рассчитанном объёме составит: дизельное топливо — 242,7 т; вакуумный газойль — 268,8 т; мазут — 290 т.

Утечка нефтегруза в результате полного разрыва перегрузочного шланга. Разгерметизация грузового шланга с разрывом на полное сечение возможна при несоблюдении предписаний сертификатов, правил и условий эксплуатации, нарушениях существующих ограничений, нерасчётных внешних воздействиях и т. д. В данном случае весь объём разлившихся нефтепродуктов с высокой степенью вероятности поступит в акваторию. Прогнозирование объёмов возможных разливов нефтегруза сводится к определению времени аварийного истечения продукта в окружающую среду при расчётном расходе в шланге (скорости погрузки/выгрузки). Для максимального времени перекрытия потока t = 300 с [13], с учётом формулы (2) и плотности нефтепродуктов [14], объёмы и массы прогнозируемых разливов составляют:

1) V = 100 м^3 — при погрузке судна и расходе Q = 1200 м^3/ч (0,333 м^3/с) при работе шести насосов с максимальной подачей по 200 м^3/ч [8]. Массы разлившихся нефтепродуктов: дизельное топливо — 83,1 т; вакуумный газойль — 92,1 т; мазут — 99,4 т;

2) V = 583 м^3 — при выгрузке судна и расходе Q = 7000 м^3/ч (1,94 м^3/с) при работе двух насосов с максимальной подачей 7000 м^3/ч [8]. Массы разлившихся нефтепродуктов: дизельное топливо — 484,5 т; вакуумный газойль — 536,7 т; мазут — 579,6 т.

such emergency scenarios may come into the marine environment. Taking into account the density of the spilled oil [14], its weight by the calculated volume will be for diesel fuel 242,7 t; vacuum gas oil — 268,8 t; fuel oil — 290 t, etc.

Leakage of oil cargo in the result of the complete tear of a handling hose. Depressurization of the handling hose with the rupture on the total cross section is possible if there are failures to comply with the requirements of the certificates, terms and conditions of use, violations of existing restrictions, unplanned external influences, etc. In this case, the entire volume of the spilled oil with a high degree of probability will go into the waters. Prediction of the volume of potential spills of oil cargo comes down to determination of time of an emergency leakage of the product into the environment having the estimated flow rate in pipe (speed of loading/unloading). For the maximum shutdown time of flow t = 300 [13], taking into account formulas (2) and oil density [14], the volume and mass of the projected spills are:

1) V = 100 m^3 during loading of the vessel and Q = 1200 m^3/h (0,333 m^3/s) when six pumps with max flow of 200 m^3/h are in operation [8]. The mass of the spilled oil will be for diesel fuel - 83,1 t; vacuum gas oil — 92,1 t; fuel oil — 99, 4 t;

2) V = 583 m3 during unloading of the vessel and Q = 7000 m^3/h (1,94 m^3/s) when two pumps with a maximum flow of 7000 m^3/h are in operation [8]. The mass of the spilled petroleum products will be for diesel fuel 484,5 t; vacuum gas oil — 536,7 t; fuel oil — to 579,6 t.

Утечка нефтегруза в результате повреждения борта и/или днища судна. Разлив нефти и нефтепродуктов при повреждении борта и/или днища судна может произойти, например, в результате столкновения, при ударе стороннего судна или посадки на мель. Эмпирическое значение общего разлива при повреждении борта и/или днища танкера определяется согласно [12]. Величина общего расчётного разлива представляет собой неполную сумму объёмов разливов при вероятном повреждении борта (Q_c) и днища (Q_s) судна, м^3:

$$Q_{общ} = 0{,}4 \cdot Q_c + 0{,}6 \cdot Q_s. \quad (3)$$

Таким образом, согласно формуле (3), в соответствии с методикой [12], вероятные разливы при повреждении борта и днища судна определяются отдельно, а после этого определяется общий предполагаемый разлив.

В случае повреждения борта судна коэффициент вероятности повреждения грузового танка составит [12]:

$$q_c = \left(1 - s_i / t_c\right) \times \frac{l_i + l_c}{L_t + l_c}, \quad (4)$$

где s_i = 2,6 — расстояние от наружной обшивки корпуса до границы грузового танка, м; $t_c = B/5 = 10$ — поперечная протяжённость повреждения борта, м; B = 48 — ширина судна, м; l_i = 33,6 — длина грузового танка, м; $l_c = \frac{1}{3} L^{2/3}$ = 14 — продольная протяжённость повреждения борта, м; L = 274 — длина судна, м; L_t = 264 — длина между передней и задней оконечностями грузовых танков, м [7, 8].

Таким образом, коэффициент вероятности повреждения грузового танка ввиду повреждения борта судна, рассчитанный по формуле (4), составляет q_c = 0,125.

Объём прогнозируемого разлива из грузового танка при повреждении борта судна [12]:

$$Q_c = q_c \cdot V_i, \quad (5)$$

где V_i = 14841,2 м^3 — максимальная вместимость грузового танка [8].

Таким образом, объём предполагаемого разлива из грузового танка при повреждении

Leakage of oil cargo in the result of the damage to the sides and/or bottom of the vessel. Oil and petroleum products spill in the result of the damage to the board and/or the bottom of the vessel can occur, for example, in a collision, collision with a third party vessel or running aground. The empirical value of the total spill damage to the board and/or the bottom of the tanker is determined according to [12]. The total estimated spill is a partial sum of the volumes of spills at a probable damage to the side (Q_c) and bottoms (Q_s) of the vessel, m^3:

$$Q_{общ} = 0{,}4 \cdot Q_c + 0{,}6 \cdot Q_s. \quad (3)$$

Thus, according to the formula (3), in accordance with the methodology of [12], the probability of a spill in the result of the damage to the sides and bottoms of the vessel is determined separately and then the total estimated spill is determined.

In case of damage to the vessel the coefficient of probability of damage to cargo tank will be [12]:

$$q_c = \left(1 - s_i / t_c\right) \times \frac{l_i + l_c}{L_t + l_c}, \quad (4)$$

where s_i = 2,6 — the distance from the shell plating to the side of the cargo tank, m; t_c = B/5 = 10 - the transverse extent of the side damage, m; B = 48 — the width of the vessel, m; l_i = 33,6 — the cargo tank length, m; $l_c = \frac{1}{3} L^{2/3}$ = 14 — the longitudinal extent of the side damage, m; L = 274 — the length of the vessel, m; L_t = 264 - the length between the front and rear extremities of the cargo tanks, m [7, 8].

Thus, the coefficient of the probability of damage to cargo tank due to damage to the vessel, calculated by the formula (4) is q_c = 0,125.

The amount of the projected spillage from the cargo tank in the result of the damage to the vessel [12]:

$$Q_c = q_c \cdot V_i, \quad (5)$$

where V_i = 14841,2 m^3 — the maximum capacity of a cargo tank [8].

Thus, the amount of the estimated spill from

борта судна, рассчитанный по формуле (5), составит Q_c = 1855,2 м^3.

При повреждении днища судна коэффициент вероятности повреждения грузового танка составит [12]:

$$q_s = \left(1 - h_i / v_s\right) \times \frac{(l_i + l_s) \times (b_i + b_s)}{(L_t + l_s) \times (B_t + b_s)}, \quad (6)$$

где h_i = 2,64 — высота двойного дна, м; v_s = B/15 = 3,2 — вертикальная протяжённость повреждения днища, м; B = 48 — ширина судна, м; l_i = 33,6 — длина грузового танка, м; l_s = 0,2L = 54,8 — продольная протяжённость повреждения днища, м; L = 274 — длина судна, м; b_i = 16,9 — ширина грузового танка, м; b_s = B/6 = 8 — поперечная протяжённость повреждения днища, м; L_t = 264 — длина между передней и задней оконечностями грузовых танков, м; B_t = 42,8 — ширина грузовой зоны, м [7, 8].

Таким образом, коэффициент вероятности повреждения грузового танка ввиду повреждения днища судна, рассчитанный по формуле (6), составляет q_s = 0,0238.

Коэффициент разлива ввиду гидростатического избыточного давления в грузовых танках [12]:

$$q_h = 1 - \frac{\rho_s (d - h_i) \times g - 100\Delta p}{1{,}1 \times \rho_c \times h_c \times g}, \quad (7)$$

где ρ_c — номинальная плотность нефтегруза, т/м^3; ρ_s = 1,025 — плотность морской воды, т/м^3; d = 17,02 — осадка судна при полной загрузке, м; h_c = 20,72 — высота столба груза над днищем грузового танка, м; Δp = 0,05 — наибольшее нормальное избыточное давление в грузовом танке, бар; g = 9,81 — ускорение свободного падения, м/с^2; 1,1 — коэффициент, учитывающий промежуточные потери, волнение и прилив [7, 8].

Таким образом, для грузовых танков коэффициент разлива ввиду гидростатического избыточного давления, рассчитанный по формуле (7), составляет q_h = 0,37.

Объём прогнозируемого разлива из грузовых танков при повреждении днища судна [12], м^3:

$$Q_s = q_s \cdot q_h \cdot V_i. \quad (8)$$

a cargo tank in the result of the damage to the vessel, calculated by the formula (5) is Q_c = 1855,2 m^3.

At damage to the bottom of the vessel, the coefficient of probability of damage to the cargo tank will be [12]:

$$q_s = \left(1 - h_i / v_s\right) \times \frac{(l_i + l_s) \times (b_i + b_s)}{(L_t + l_s) \times (B_t + b_s)}, \quad (6)$$

where h_i = 2,64 — the double bottom height, m; v_s = B/15 = 3,2 — the vertical extent of bottom damage, m; B = 48 — the width of the vessel, m; l_i = 33,6 — the cargo tank length, m; l_s = 0,2 L = 54,8 – the longitudinal extent of bottom damage, m; L = 274 — the length of the vessel, m; b_i = 16,9 — the width of the cargo tank, m; b_s = B/6 = 8 — the transverse extent of bottom damage, m; L_t = 264 - the length between the front and rear extremities of the cargo tanks, m; B_t = 42,8 — the cargo area width, m [7, 8].

Thus, the coefficient of the probability of damage to the cargo tank due to thebdamage to the bottom of the vessel, calculated by the formula (6) is q_s = 0,0238.

The spill factor due to the hydrostatic overpressure in cargo tanks [12]:

$$q_h = 1 - \frac{\rho_s (d - h_i) \times g - 100\Delta p}{1{,}1 \times \rho_c \times h_c \times g}, \quad (7)$$

where ρ_c - the nominal density of the oil cargo, t/m^3; ρ_s = 1,025 - the density of the sea water, t/m^3; d = of 17,02 — the draught of the fully loaded ship, m; h_c = 20,72 — the post height of cargo above the bottom of the cargo tank, m; Δp = 0,05 - the highest normal overpressure in the cargo tank, bar; g = 9,81 — free fall acceleration, m/s^2; 1,1 — the coefficient, which takes into account interim losses, the sea disturbance and tide rise [7, 8].

Therefore, for cargo tanks, the spill factor due to the hydrostatic overpressure, calculated by the formula (7) is q_h = 0,37,

The amount of the projected spillage from cargo tanks because of the damage to the bottom of the vessel [12], m^3:

$$Q_s = q_s \cdot q_h \cdot V_i. \quad (8)$$

Вычисленный объем составил Q_s = 130,7 м^3.

Таким образом, общий прогнозируемый разлив из грузовых танков при повреждении борта и/или днища судна, рассчитанный по эмпирической формуле (3) [12], составляет $Q_{общ}$ = 820,5 м^3.

Количественное выражение разлива по массе для перегружаемых нефтепродуктов, с учётом их плотности [14], составляет: мазут — 815,7 т; вакуумный газойль — 755,3 т; дизельное топливо — 681,9 т.

Максимальный расчётный разлив. В качестве максимального расчётного разлива для судна с двойным корпусом (двойным дном и двойными бортами) в соответствии с [9] принимается разлив в количестве 50% двух смежных танков, который, учитывая максимальную вместимость грузового танка V_i и плотность разлившихся нефтепродуктов, составляет объём, равный 14841,2 м^3, и массу, равную: для мазута — 14755 т; вакуумного газойля — 13662,8 т; дизельного топлива — 12334,5 т.

Согласно различным данным вероятность такого разлива — 1 раз в 8000 лет [12] или 1 раз в 167000 лет [15], поскольку опорожнение двух танков возможно только при переломе крупнотоннажного танкера на длинной волне. Учитывая наличие двойного корпуса, для таких серьёзных повреждений необходимы огромные нагрузки на корпус, которые могут возникнуть исключительно на гребне или у подошвы волны вследствие воздействия волн определённой длины. Условия плавания судов в морских портах черноморского побережья России позволяют допустить гипотетическую возможность подобных повреждений только на подходе к порту на внешнем рейде [15].

Итоговые результаты количественной оценки масштабов прогнозируемых аварийных разливов нефтепродуктов при их перевалке на акваториях рейдовых перегрузочных районов морских портов сведены в таблицу.

The calculated volume was Q_s = of 130,7 m^3.

Thus, the total projected spill from cargo tanks because of the damage to the board and/or the bottom of the vessel, calculated by the empirical formula (3) [12], is $Q_{общ}$ = 820,5 m^3.

A quantitative expression of the spill by the weight of the oil transshipped, with regard to its density [14], is for oil — 815,7 t; vacuum gas oil — 755,3 t; diesel fuel — 681,9 t.

The maximum calculated spill. The maximum calculated spill for the vessel with double hull (double bottom and double sides) according to [9] is the spill in the amount of 50% of two adjacent tanks, which, given the maximum capacity of cargo tanks Vi and the density of the spilled oil, is a volume of 14841,2 m^3, and a mass for oil — 14755 t; for vacuum gas oil 13662,8 t; for diesel fuel — 12334,5 t.

According to various reports, the probability of such spill — 1 time in 8000 years [12] or once in 167000 years [15], since the emptying of the two tanks is only possible when there occurs the fracture of large tankers on long wave. Given the presence of the double hull, such serious injuries require huge loads on the hull, which can be only on the crest or at the foot of the wave due to the impact of waves of a certain length. The conditions of navigation in seaports of the Black sea coast of Russia allow the hypothetical possibility of such damages only on the approach to the port in the outer roads [15].

The results of the quantitative assessment of the extent of the predicted disaster of oil spills during transshipment in the waters of the roadstead transshipment areas of seaports are summarized in the table.

Table
Таблица

Расчётные характеристики прогнозируемых аварийных разливов нефтепродуктов
Calculated characteristics of the predicted disaster of oil spills

п/п	Источник разлива / Sourse of the spill	Тип нефтепродукта / Oil product type	Объём, м^3 /Volume, m^3	Количество, тонны /Quantity, tons
1	Утечка нефтепродуктов в результате малого повреждения перегрузочного шланга / *Ooil spills as a result of a small damage to a handling hose*	Дизельное топливо / *Diesel fuel* Вакуумный газойль / *Vacuum gas oil* Мазут / *Fuel oil*	1,1	0,91 1,01 1,09
2	Утечка нефтепродуктов в результате перелива грузового танка судна при погрузке / *Oil spills as a result of overfilling of a cargo tank of the vessel during loading*	Дизельное топливо / *Diesel fuel* Вакуумный газойль / *Vacuum gas oil* Мазут / *Fuel oil*	25	20,8 23 24,8
3	Утечка нефтепродуктов в результате частичного разрыва перегрузочного шланга / *Oil spills as a result of partial tear of a handling hose*	Дизельное топливо / Diesel fuel Вакуумный газойль / Vacuum gas oil Мазут / Fuel oil	25	242,7 268,8 290
4	Утечка нефтепродуктов в результате полного разрыва перегрузочного шланга при погрузке судна / *Oil spills as a result of a complete tear of a handling hose during the loading of the vessel*	Дизельное топливо / Diesel fuel Вакуумный газойль / Vacuum gas oil Мазут / Fuel oil	292	83,1 92,1 99,4
5	Утечка нефтепродуктов в результате полного разрыва перегрузочного шланга при выгрузке судна / *Oil spills as a result of a complete tear of a handling hose during the unloading of the vessel*	Дизельное топливо / Diesel fuel Вакуумный газойль / Vacuum gas oil Мазут / Fuel oil	100	484,5 536,7 579,6
6	Утечка нефтепродуктов в результате повреждения борта и/или днища судна / *Oil spills as a result of damage to the sides and/or bottoms of the vessel*	Дизельное топливо / Diesel fuel Вакуумный газойль / Vacuum gas oil Мазут / Fuel oil	583	681,9 755,3 815,7
7	50% опорожнение двух смежных танков при их повреждении в результате перелома судна / *50% emptying of the two adjacent tanks when they are damaged as a result of the fracture of the vessel*	Дизельное топливо / Diesel fuel Вакуумный газойль / Vacuum gas oil Мазут / Fuel oil	820,5	12334,5 13662,8 14755
8	Утечка нефтепродуктов в результате частичного разрыва перегрузочного шланга / *Oil spills as a result of partial tear of a handling hose*	Дизельное топливо / Diesel fuel Вакуумный газойль / Vacuum gas oil Мазут / Fuel oil	14841,2	20,8 23 24,8

Заключение. Произведена количественная оценка вероятных объёмов и масс аварийных разливов таких нефтепродуктов, как мазут, вакуумный газойль и дизельное топливо в зависимости от прогнозируемых условий возникновения аварийных ситуаций, включающих различные виды повреждения узловых компонентов переливного оборудования при проведении погрузочно-разгрузочных операций между судами. Полученные в работе результаты расчётов могут быть использованы для составления заблаговременных прогнозов чрезвычайных ситуаций, обусловленных разливами нефтепродуктов на акватории рейдовых перегрузочных районов морских портов черноморского побережья России и принятия необходимых мер безопасности для предупреждения указанных разливов.

Библиографический список.

1. Ерёменко, О. А. Анализ методов локализации и ликвидации аварийных разливов нефти и нефтепродуктов и целесообразности применения при этом сорбентов / О. А. Ерёменко, Н. Д. Поляков, В. В. Озерянская // Повышение международной конкурентоспособности российской инновационной продукции и технологий предприятий Ростовской области: сб. науч. трудов I междунар. науч.-практ. конф. —Ростов-на-Дону, 2016. — С. 74–78.

2. Формирование и функционирование территориально-производственных комплексов / В. В. Озерянская [и др.]. — Ростов-на-Дону : Изд. центр ДГТУ, 2012. — 76 с.

3. Озерянская, В. В. Изучение и анализ природных сред, процессов и явлений / В. В. Озерянская, Б. Ч. Месхи, Р. Р. Лазуренко. — Ростов-на-Дону : Изд. центр ДГТУ, 2017. — 149

Conclusion. The authors have conducted quantitative assessment of the probable volumes and masses of accidental spills of petroleum products such as fuel oil, vacuum gasoil and diesel fuel depending on the predicted conditions of emergencies, including different types of damage to the components of transshipment equipment during loading and unloading operations between ships. The obtained results of calculations can be used to make early forecasts of emergencies caused by oil spills in the waters of the roadstead transshipment areas of the seaports of the Black sea coast of Russia and to take the necessary security measures to prevent these spills.

References.

1. Eremenko, A.O., Polyakov, N.D., Ozeryanskaya, V.V. Analiz metodov lokalizatsii i likvidatsii avariynykh razlivov nefti i nefteprosuktov i tselesoobraznosti primeneniya pri etom sorbentov. [Analysis of methods of localization and liquidation of emergency floods of oil and oil products and the feasibility of application of sorbents.] Povyshenie mezhdunarodnoy konkurentosposobnosti rossiyskoy innovatsionnoy produktsii i tekhnologiy Rostovskoy oblasti: sb. nauch. trudov I mezhdunar. nauch.-prakt. konf. [Increase in the international competitiveness of Russian innovative products and technologies of the enterprises of the Rostov region: coll. of sci. works. proceedings of the I Intern. scientific.-pract. conf.] Rostov-on-Don, 2016, pp. 74-78 (in Russian).

2. Ozeryanskaya, V.V. et al. Formirovanie i funktsionirovanie territorial'no-proizvodstvennykh kompleksov. [The formation and functioning of territorial production complexes.] Rostov-on-Don: Izd. tsentr DSTU, 2012, 76 p. (in Russian).

3. Ozeryanskaya, V.V., Meskhi, B.C., Lazurenko, R.R. Izuchenie i analiz prirodnykh sred, protsessov i yavleniy. [Investigation and analysis of natural environments, processes and effects.] Rostov-on-Don, Izd. tsentr DSTU,

с.

4. Богданова, И. В. Выявление основных причин аварий и инцидентов на опасных производственных объектах химической отрасли / И. В. Богданова, А. А. Согомонян, Т. В. Дубовая // Новые направления модернизации педагогического образования в формировании здорового образа жизни и безопасности жизнедеятельности: материалы IV регион. науч.-практ. конф. ЮФО. — Краснодар : ИПЦ КубГУ, 2016. — С. 184–188.

5. Расчёты по безопасности и экологичности процессов и производств. / А. Е. Аствацатуров [и др.]. — Ростов-на-Дону : Изд. центр ДГТУ, 2004. — 77 с.

6. Чачанагова, Е. Д. Пути решения проблемы восстановления водоёмов Ростовской области / Е. Д. Чачанагова, О. В. Дымникова, И. В. Думенко // Новые направления модернизации педагогического образования в формировании здорового образа жизни и безопасности жизнедеятельности: материалы V регион. науч.-практ. конф. ЮФО. — Краснодар : ИПЦ КубГУ, 2017. — С. 272–276.

7. Международное руководство по безопасности для нефтяных танкеров и терминалов (ISGOTT, 5-е издание). — Санкт-Петербург : ЗАО «ЦНИИМФ», 2007. — 504 с.

8. 7-М Общие и специальные правила перевозки наливных грузов. — Санкт-Петербург : ЗАО «ЦНИИМФ», 1997. — 560 с.

9. Правила организации мероприятий по предупреждению и ликвидации разливов нефти и нефтепродуктов на континентальном шельфе Российской Федерации, во внутренних морских

2017, 149 p. (in Russian).

4. Bogdanova, I.V., Sogomonyan, A.A., Dubovaya, T.V. Vyyavlenie osnovnykh prichin avariy i intsidentov na opasnykh proizvodstvennykh ob'ektakh khimicheskoy otrasli. [Identification of the main causes of accidents and incidents at hazardous production facilities of the chemical industry.] Novye napravleniya modernizatsii pedagogicheskogo obrazovaniya v formirovanii zdorovogo obraza zhizni i bezopasnosti zhiznedeyatel'nosti: materialy IV region. nauch.-prakt. konf. YUFO. [New directions of modernization of pedagogical education in the formation of healthy lifestyle and safety: proceedings of the IV region. scientific.-pract. conf. SFD.] Krasnodar, IPTS KubGU, 2016, pp. 184-188 (in Russian).

5. Astvatsaturov, A.E. Raschety po bezopasnosti i ekologichnosti protsessov i proizvodstv. [The calculations of the safety and environmental performance of processes and production.] Rostov-on-Don, Izd. tsentr DSTU, 2004, 77 p. (in Russian).

6. Chachanagova, E.D., Dymnikova, O.V., Dumenko, I.V. Puti resheniya problem vostanovleniya vodoemov Rostovskoy oblasti. [Solutions to problems of water bodies restoration of the Rostov region.] Novye napravleniya modernizatsii pedagogicheskogo obrazovaniya v formirovanii zdorovogo obraza zhizni i bezopasnosti zhiznedeyatel'nosti: materialy V region. nauch.-prakt. konf. YUFO. [New directions of modernization of pedagogical education in the formation of healthy lifestyle and safety: proceedings of the V region. scientific.-pract. conf. SFD.] Krasnodar, IPTS KubGU, 2017, pp. 272-276 (in Russian).

7. Mezhdunarodnoe rukovodstvo po bezopasnosti dlya neftyanykh tankerov i terminalov (ISGOTT, 5-e izdanie). [International safety guide for oil tankers and terminals (ISGOTT, 5th edition).] Saint Petersburg, ZAO "TSNIIMF", 2007, 504 p. (in Russian).

8. 7-M Obshchie i spetsial'nye pravila perevozki nalivnykh gruzov. [7-M General and special rules for transportation of liquid cargoes.] Saint Petersburg, ZAO "TSNIIMF", 1997, 560 p. (in Russian).

9. Pravila organizatsii meropriyatiy po preduprezhdeniyu i likvidatsii razlivov nefti i

водах, в территориальном море и прилежащей зоне Российской Федерации : постановление Правительства РФ №1189 от 14.11.14 [Электронный ресурс] / Электрон. фонд правовой и норматив.-техн. документации / Консорциум «Кодекс». — Режим доступа : http://docs.cntd.ru/document/420233302 (дата обращения : 15.07.17).

10. Нормы пожарной безопасности. Определение категорий помещений, зданий и наружных установок по взрывопожарной и пожарной опасности : НПБ 105–03 [Электронный ресурс] / Электрон. фонд правовой и норматив.-техн. документации / Консорциум «Кодекс». — Режим доступа : http:// docs.cntd.ru /document/ 1200032102 (дата обращения : 11.07.17).

11. Методика оценки последствий аварий на пожаро-, взрывоопасных объектах // Сборник методик по прогнозированию возможных аварий, катастроф, стихийных бедствий в РСЧС (книга 2). — Москва : МЧС России, 1994. — 23 с.

12. Международная Конвенция по предотвращению загрязнения с судов (МАРПОЛ-73/78). — Санкт-Петербург : АО «ЦНИИМФ», 2017 г. — 824 с.

13. Воробьев, Ю. Л. Предупреждение и ликвидация аварийных разливов нефти и нефтепродуктов / Ю. Л. Воробьев, В. А. Акимов, Ю. И. Соколов. — Москва : Ин-октаво, 2005. — 368 с.

14. Маценко, С. В. Ликвидация разливов нефти и нефтепродуктов на море и внутренних акваториях. Расчёт достаточности сил и средств

nefteproduktov na kontinental'nom shel'fe Rossiyskoy Federatsii, vo vnutrennikh morskikh vodakh, v territorial'nom more i prilezhashchey zone Rossiyskoy Federatsii: postanovlenie Pravitel'stva RF no. 1189 ot 14.11.14. [Rules of organization of measures for prevention and liquidation of spills of oil and oil products on continental shelf of the Russian Federation, in internal seawaters, territorial sea and contiguous zone of the Russian Federation: the Russian Federation Government resolution No. 1189 of 14.11.14.] Elektron. fond pravovoy i normativ.-tekhn. Dokumentatsii. Konsortsium "Kodeks". [Electron. fund of legal and the norm.-tech. documentation. Consortium "Kodeks".] Available at: http://docs.cntd.ru/document/420233302 (accessed: 15.07.17) (in Russian).

10. Normy pozharnoy bezopasnosti. Opredelenie kategoriy pomeshcheniy, zdaniy i naruzhnykh ustanovok po vzryvopozharnoy i pozharnoy opasnosti: NPB 105-03. [Standards for fire safety. Definition of categories of rooms, buildings and external installations on explosion and fire hazard: NPB 105-03.] Elektron. fond pravovoy i normativ.-tekhn. Dokumentatsii. Konsortsium "Kodeks". [Electron. fund of legal and the norm.-tech. documentation. Consortium "Kodeks".] Available at: http:// docs.cntd.ru /document/ 1200032102 (accessed: 11.07.17) (in Russian).

11. Metodika otsenki posledstviy avariy na pozharo-, vzryvoopasnykh ob'ektakh. [Methods of assessment of consequences of accidents at fire-hazardous, explosive objects.] Sbornik metodik po prognozirovaniyu vozmozhnykh avariy, katastrof, stikhiynykh bedstviy v RSCHS (kniga 2). [Collection of methods for prediction of possible accidents, catastrophes, natural disasters in Russian System of Prevention and Response to ES (book 2).] Moscow, MCHS Rossii, 1994, 23 p. (in Russian).

12. Mezhdunarodnaya Konventsiya po predotvrashcheniyu zafryazneniya s sudov (MARPOL-73/78). [International Convention on the prevention of pollution from ships (MARPOL-73/78).] Saint Petersburg, AO "TSNIIMF", 2017, 824 p. (in Russian).

13. Vorobev, Y.L., Akimov, V.A., Sokolov, Y.I. Preduprezhdenie i likvidatsiya avariynykh razlivov nefti i nefteproduktov. [Prevention and

/ С. В. Маценко, Г. Г. Волков, Т. А. Волкова. — Новороссийск : МГА им. адм. Ф.Ф. Ушакова, 2009. — 78 с.

15. Маценко, С. В. О вероятности крупномасштабных аварий танкеров в морских портах / С. В. Маценко, Н. Н. Чура, В. С. Бердников // Эксплуатация морского транспорта. — Санкт-Петербург : ГМА им. адм. С.О. Макарова, 2009. — Вып. 2 (56). — С. 69–72.

liquidation of oil and oil products spills.] Moscow, In-oktavo, 2005, 368 p. (in Russian).

14. Matsenko, S.V., Volkov, G.G., Volkova, T.A. Likvidatsiya razlivov nefti i nefteproduktov na more i vnutrennikh akvatoriyakh. Raschet dostatochnosti sil i sredstv. [Elimination of spills of oil and oil products in sea and inland waters. Calculation of the sufficiency of forces and means.] Novorossiysk, MGA im. adm. F.F. Ushakova, 2009, 78 p. (in Russian).

15. Matsenko, S.V., Chura, N.N., Berdnikov, V.S. O veroyatnosti krupnomasshtabnykh avariy tankerov v morskikh portakh. [On probabilities of large-scale accidents of tankers at seaports.] Ekspluatatsiya morskogo transporta, Saint Petersburg GMA im. adm. S.O. Makarova, 2009, vol. 2 (56), pp. 69-72 (in Russian).

Поступила в редакцию 25.04.2017
Сдана в редакцию 26.04.2017
Запланирована в номер 05.06.2017

Received 25.04.2017
Submitted 26.04.2017
Scheduled in the issue 05.06.2017

Озерянская Виктория Викторовна,
кандидат химических наук, доцент Донского государственного технического университета,
(РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1)
bommvoz@mail.ru

Лазуренко Роберт Робертович,
старший преподаватель кафедры Донского государственного технического университета,
(РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1)
777bigdan@mail.ru

Данилова Анастасия Романовна,
магистрант Донского государственного технического университета,
(РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1)
ms.anastasiya1994@mail.ru

Лакуш Елизавета Васильевна,
магистрант Донского государственного технического университета,
(РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1)
Elizaveta-sergeevna94@mail.ru

Ozeryanskaya Viktorya Viktorovna,
Cand. of chem. Sciences, Associate professor, Don State Technical University (Gagarin sq., 1, Rostov-on-Don, Russian Federation)
bommvoz@mail.ru

Lazurenko Robert Robertovich,
Senior lecturer of Don State Technical University (Gagarin sq., 1, Rostov-on-Don, Russian Federation)
777bigdan@mail.ru

Danilova Anastasiya Romanovna,
Master's degree student *of Don State Technical University (Gagarin sq., 1, Rostov-on-Don, Russian Federation)*
ms.anastasiya1994@mail.ru

Lakush Elizaveta Vasilevna,
Master's degree student of Don State Technical University (Gagarin sq., 1, Rostov-on-Don, Russian Federation)
Elizaveta-sergeevna94@mail.ru

УДК 614.8
DOI 10.23947/2541-9129-2017-3-47-64

РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ВОЗМОЖНОСТНОЙ ОЦЕНКИ БЕЗОПАСНОСТИ ТЕХНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ «ОБЪЕКТ ЗАХОРОНЕНИЯ ОТХОДОВ – ЗАЩИТА – НАСЕЛЕННЫЙ ПУНКТ»

Э. Г. Хорошун, Ю. В. Есипов

Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация

horoshun.rpn-eko@bk.ru
yu-yesipov5@yandex.ru,

В рамках параметрического моделирования проведен анализ уникальной системы «объект захоронения отходов – защита – населенный пункт» с позиции её потенциальной опасности. Установлены потенциальные вершинные исходы нарушения правил эксплуатации объекта захоронения отходов и разработана структурно-логическая модель их реализации. На основании полученных данных проведена апробация логико-возможностного метода экспресс-оценки системы «объект захоронения отходов – защита – населенный пункт» и получены значения возможностной меры реализации вершинного исхода для действующего объекта захоронения отходов. Разработана схема определения защитных мероприятий для снижения концентрации нитратов в грунтовых водах, на основании которой была установлена необходимость разработки инструкции по сбору и транспортированию фильтрата объекта захоронения отходов.

Ключевые слова: безопасность, система «объект захоронения отходов – защита – населенный пункт», случайное событие, вершинный исход, возможностная мера, параметрическая модель «воздействие-восприимчивость».

Введение. Одним из наиболее важных вопросов охраны окружающей среды в

UDC 614.8
DOI 10.23947/2541-9129-2017-3-47-64

METHOD DEVELOPMENT OF PROBABILISTIC SAFETY ASSESSMENT OF THE TECHNICAL SYSTEMS «OBJECT OF WASTE DISPOSAL – PROTECTION – LOCALITY»

E. G. Khoroshun, Y. V. Esipov

Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russian Federation

horoshun.rpn-eko@bk.ru
yu-yesipov5@yandex.ru,

In the framework of parametric modeling, the paper provides the analysis of a unique system «object of waste disposal – protection – locality» from the perspective of its potential danger. It establishes the vertex set of the potential outcomes of violations of the rules of operation of waste disposal and develops a logical model for their realization. Based on the data the authors have tested the logic-probabilistic method of rapid assessment system "object of waste disposal – protection – locality" and got the resulting values of probabilistic realization of the vertex outcome for the current object of disposal. The scheme for determination of protective measures to reduce nitrate concentrations in groundwater was developed. On its basis, the authors have established the necessity to develop instructions for the collection and transportation of object of waste disposal infiltrate.

Keywords:: Protection, system «object of waste disposal – protection – locality», random event, vertex outcome, probabilistic measure, parametric model «influence – susceptibility»

Introduction. One of the most important issues of the environmental protection in the

Российской Федерации и в Ростовской области, остается вопрос обращения с отходами производства и потребления.

По данным официальной статистики ежегодно на территории области образуется около 5 млн т отходов. На переработку идет примерно четверть, остальное вывозится на специальные полигоны — объекты захоронения отходов.

Согласно сведениям из регионального кадастра отходов производства и потребления, включающим данные, представляемые органами местного самоуправления, на начало 2016 года на территории области расположено 616 объектов захоронения коммунальных отходов [1]. Из них:

1. Действующих (415) — 15 полигонов; 244 санкционированных и 129 несанкционированных свалок твердых коммунальных отходов.

2. Законсервированных (выведенных из эксплуатации) (214) — 214 свалок твердых коммунальных отходов.

Существующие объекты захоронения отходов характеризуются длительным и интенсивным негативным воздействием на окружающую среду. Обустройство и содержание объектов не соответствуют установленным законом требованиям [2].

Эксплуатация объектов захоронения отходов сопряжена определенным экологическим риском, в ходе оценки которого возникает ряд сложностей.

Система "объект захоронения отходов – защита – населенный пункт" является плохо статистически изученной системой.

Проблема предсказуемости и (или) оценки вероятности возникновения происшествия (заболевание, несчастный случай, авария, катастрофа) на уровне величины ниже доли процента в плохо статистически изученной системе является одной из актуальных задач как на этапе разработки, так и на этапе её эксплуатации [3]. Оценка и прогноз безопасности системы зависят как от глубины детализации раскрытия компонентов системы

Russian Federation and in the Rostov region is the question about production and consumer waste disposal.

According to official statistics, every year the region produces about 5 million tons of waste. For processing goes roughly a quarter of it, and the rest is transported to special landfills — waste disposal sites.

According to information from the regional cadaster of production and consumer waste, including the data submitted by local authorities, at the beginning of 2016 the region has 616 landfills of municipal waste [1]. Out of them:

1. Existing ones (415) — 15 sites; 244 129 authorized and unauthorized dumps of solid municipal waste.

2. Inactive ones (214) — 214 dumps of municipal solid waste.

Existing waste disposal sites are characterized by the prolonged and intense negative impact on the environment. The construction and maintenance of facilities do not meet the statutory requirements [2].

Operation of waste disposal sites carries a certain environmental risk, the assessment of which has a number of challenges.

The system of "object of waste disposal – protection – locality" is a poorly statistically studied system.

The problem of predictability and (or) assessment of the probability of occurrence of the incident (illness, accident, crash, disaster) at the value level below one percent in statistically badly studied system is one of the urgent tasks at the development stage and at the stage of its operation [3]. The assessment and prediction of security of the system depend on the granularity of the system components "object of waste disposal – protection – locality", and the degree

"объект захоронения отходов – защита – населенный пункт", так и от степени изученности, полноты и достоверности информации о предпосылках происшествий, факторах и их связях относительно рассматриваемых вершинных исходов [4].

Концепция приемлемого риска уникальных систем предполагает методическое объединение предопределенности структурных связей компонентов и неполной предсказуемости областей варьирования параметров факторов и характеристик объекта системы. Вследствие этого концепция приемлемого риска получила дальнейшее развитие на основе разработки и применения двух взаимодополняющих методов логико-вероятностного метода анализа и оценки безопасности типовых систем и логико-возможностного метода экспресс-оценки уникальных систем [5].

Целью работы является адаптация логико-возможностного метода параметрического моделирования в уникальной системе «объект захоронения отходов – защита – населенный пункт» для оценки экологического риска эксплуатации опасных элементов с установлением мер управления, снижения опасности и последующая апробация адаптированного метода на действительном объекте с предложением решений достижения приемлемого экологического риска.

Теоретическая часть. На основании анализа алгоритма определения и последующего расчета показателей безопасности для системы "объект – защита – среда" установлено, что для системы "объект захоронения отходов – защита – населенный пункт" алгоритм определения и последующий расчет показателей экологической безопасности состоит из следующих задач:

1. Проанализировать варианты вершинных исходов (ВИ) негативного воздействия объекта размещения отходов на окружающую среду.
2. Установить предпосылки реализации ВИ.
3. Построить конструкцию логической модели реализации ВИ.

of knowledge, completeness and accuracy of the information on the preconditions of accident factors and their relationship with respect to the considered vertex outcomes [4].

The concept of acceptable risk of unique systems involves methodical connection of predetermination of the structural relationships of the components and the incomplete predictability of the parameters variation ranges of the factors and characteristics of the object of the system. As a result, the concept of the acceptable risk was further developed through the development and application of two complementary methods of logical and probabilistic method of analysis and safety assessment of typical systems and logical-probabilistic method of rapid assessment of unique systems [5].

The aim of this work is the adaptation of logical-probabilistic method of parametric modeling in the unique system "object of waste disposal – protection – locality" for ecological risk assessment of the operation of the hazardous elements and for establishing management measures, for risk reduction and subsequent testing of the adapted method on a valid object with a range of solutions to achieve acceptable environmental risk.

Theoretical part. Based on the analysis of the determination algorithm and the subsequent calculation of parameters of system "object – protection – environment" it was found that "the object of waste disposal – protection – locality" determination algorithm and the subsequent calculation of indicators of ecological security consists of the following tasks:

1. To review the options for vertex outcomes (VO) of the negative impact of waste disposal on the environment.
2. To establish the preconditions for the realization of VO.
3. To build the design of the logical model of realization of VO.

4. Рассчитать возможностные меры реализации случайных событий.

5. Построить возможностную форму функции реализации ВИ.

6. Подставить в неё возможностные меры реализации элементарных предпосылок.

7. Получить итоговый результат в виде возможностной меры реализации ВИ в системе "объект захоронения отходов-защита-населенный пункт" [6,7].

Размещение отходов, в том числе их захоронение, осуществляется на объектах, которые являются природоохранными сооружениями, обеспечивающими снижение или предотвращение негативного воздействия на окружающую среду.

Под экологическими аспектами захоронения отходов, в соответствии с общепринятым определением, следует понимать элементы деятельности по захоронению отходов и её результаты, которые, в конечном итоге, могут оказывать влияние на окружающую среду [8].

К основным экологическим аспектам при захоронении отходов производства и потребления могут относиться: изъятие земельных ресурсов или участков недр под строительство объекта; обращение с опасными для окружающей среды веществами; поступление загрязняющих веществ в геологическую среду подземных, водных объектов, горных пород, почву; поступление загрязняющих веществ в поверхностные водные объекты и на близлежащие территории; выбросы загрязняющих веществ в атмосферный воздух. Опосредованное воздействие на растительный и животный мир — биологическое загрязнение окружающей среды и вероятность возникновения пожаров (для отходов, выделяющих пожароопасные вещества, в том числе при длительном хранении) [9].

Основными причинами сложности определения конкретно реализуемых групп событий, связей между ними и конечного результата их реализации — вершинного исхода, является их большое количество и

4. To calculate probabilistic realization measures of random events.

5. To build the probabilistic form of the function of the realization of VO.

6. To put in it the probabilistic measures of realization of the basic preconditions.

7. To obtain the final result in the form of probabilistic realization of VO measures in the system "object of waste disposal-protection-locality" [6,7].

Waste disposal, including dumping, is carried out on the objects that are environmental structures that reduce or prevent negative impacts on the environment.

Under the environmental aspects of waste disposal, in accordance with the generally accepted definition, we should understand the elements of dumping activity and its results, which, ultimately, may impact on the environment [8].

The main environmental aspects in production and consumer waste disposal may include: withdrawal of natural resources or subsoil for construction of buildings; handling with environmentally hazardous substances; flow of pollutants into the geological environment of underground bodies, water bodies, rocks, soil; flow of pollutants into surface water objects and nearby territories; emissions of polluting substances in atmospheric air. Indirect effects on flora and fauna — biological pollution and risk of fire (waste, emit flammable substances, especially if stored for a long time) [9].

The main reasons for the difficulty of defining of specifically realized groups of events, connections between them and the result of their realization - the vertex outcome, is their large number and the presence of indirect causes and consequences of their realization.

Therefore, if we consider a system "object of

наличие косвенных причин и последствий их реализации.

Так, если рассматривать систему "объект захоронения отходов – защита – населенный пункт", то, опираясь на вышеперечисленные экологические аспекты, можно определить некоторые вероятные события, воздействующие на окружающую среду. Представление экологических аспектов, как предпосылок происшествий и исходов загрязнения, сведено в таблицу 1.

waste disposal – protection – locality", then, based on the above mentioned ecological aspects, it is possible to determine some plausible events, which have impact on the environment. Presentation of environmental aspects as preconditions of accidents and pollution outcomes are summarized in table 1

Table 1
Таблица 1

Примеры связи экологических аспектов захоронения отходов и предпосылок происшествий как случайных событий

Examples of the connection of the environmental aspects of waste disposal and accidents preconditions as random events

Экологический аспект *Environmental aspects*	Случайное событие *Random event*
Обращение с опасными для окружающей среды веществами / *Handling environmentally hazardous substances*	Превышение установленных концентраций опасных для окружающей среды веществ / *Exceeding the concentrations of environmentally hazardous substances*
Поступление загрязняющих веществ в геологическую среду подземные водные объекты, горные породы, почвы / *The flow of pollutants into the geological environment and underground water bodies, rocks, soils*	Превышение установленных концентраций веществ в геологической среде подземных водных объектах, горных породах, почве / *Exceeding concentrations in the geological environment and underground water bodies, rocks, soil*
Поступление загрязняющих веществ в поверхностные водные объекты поверхностные водные объекты и на близлежащие территории / *The flow of pollutants into the surface water bodies and surrounding areas*	Превышение установленных концентраций веществ в поверхностных водных объектах и на близлежащих территориях / *Exceeding concentrations in surface water bodies and nearby territories*
Выбросы загрязняющих веществ в атмосферный воздух / *Emissions of polluting substances in atmospheric air*	Превышение установленных концентраций веществ в атмосферном воздухе / *Exceeding concentrations in natural air*
Биологическое загрязнение окружающей среды / *Biological pollution of the environment.*	Заболевания животных и населения / *Animal disease and people diseases*

На основании действующего законодательства, обустройство и содержание объектов захоронения отходов должно соответствовать установленным требованиям [10,11].

Если исходить из принципа, предполагающего безопасность эксплуатации объекта захоронения отходов при его соответствии указанным требованием, то на их основании можно выделить следующие основные значимые предпосылки происшествий в системе «объект захоронения – защита – населенный пункт»:

– отсутствие или некорректность учета климатогеографических и почвенных особенностей, геологических и гидрологических условий местности при выборе участка под устройство объекта захоронения отходов;

– отсутствие или некорректность санитарно-эпидемиологического заключения о соответствии объекта захоронения отходов санитарным правилам;

– отсутствие или некорректность регламента и режима работы объекта захоронения отходов санитарным правилам

– отсутствие или некорректность инструкции по приему бытовых отходов, с учетом требований производственной санитарии для работающих на объекте захоронения отходов;

– отсутствие или некорректность контроля за составом поступающих отходов, учета поступающих отходов,

– отсутствие или некорректность контроля за распределением отходов в работающей части объекта, обеспечения технологического цикла по изоляции отходов;

– прием недопустимых к захоронению отходов;

– захоронение и обезвреживание твердых, пастообразных отходов промышленных предприятий (1–2 класса опасности), в которых содержатся токсичные вещества, тяжелые металлы, а также горючие и взрывоопасные

On the basis of the current legislation, the construction and maintenance of waste disposal sites must comply with the requirements [10, 11].

If we take the principle involving the safety of operation of object of disposal when it meets the specified requirement, then on that basis we can single out the following main significant determinants of accidents in the "object of waste disposal – protection – locality":

– the absence or incorrect accounting of climatic and soil characteristics, geological and hydrological conditions of the terrain when choosing a site for an object of waste disposal;

– the absence or incorrectness of the sanitary-epidemiological conclusion on the compliance of the object of waste disposal to sanitary rules;

the absence or incorrectness of the rules and mode of operation of a waste disposal sanitary rules

– the absence or incorrectness of the rules for consumer waste receiving, taking into account the requirements of industrial hygiene for workers at the waste disposal facility;

– the absence or incorrectness of control over the composition of the incoming waste, account of incoming waste,

– the absence or incorrectness of control over the distribution of waste in the operating part of the object, provision of technological cycle for the waste isolation;

– reception of unacceptable to disposal waste;

– burial and neutralization of solid, pasty industrial waste (1-2 class of danger), which contain toxic substances, heavy metals, and flammable and explosive wastes at the facilities, with violations of sanitary regulations on the

отходы, на объектах, организованных не в соответствии с санитарными правилами о порядке накопления, транспортировки, обезвреживания и захоронения токсичных промышленных отходов;

– прием трупов павших животных, конфискатов боен мясокомбинатов на объекты захоронения отходов производства и потребления;

– прием твердых отходов лечебно-профилактических учреждений с нарушением правил сбора, хранения и удаления отходов лечебно-профилактических учреждений;

– сбор вторичного сырья непосредственно из мусоровозного транспорта;

– сортировка и селективный сбор отходов при нарушении санитарно-гигиенических требований.

Для населенного пункта экологическая обстановка может классифицироваться по возрастанию степени экологического неблагополучия следующим образом [12]:

– относительно удовлетворительная;

– напряженная;

– критическая;

– кризисная (или зона чрезвычайной экологической ситуации);

– катастрофическая (или зона экологического бедствия).

Результатом указанных случайных событий может стать приобретение населённым пунктом признаков территории крайней степени неблагополучия [13]. Для определения критериев качества окружающей среды, классифицирующих территорию как напряженную и критическую, требуются дополнительные исследования.

Структурно-логическая модель реализации вершинных исходов в системе "объект захоронения отходов – защита – населенный пункт" представлена на рис. 1.

procedure for accumulation, transportation, neutralization and burial of toxic industrial wastes;

– the reception of the corpses of fallen animals, condemned material of meat processing plants on the objects of production and consumer waste disposal;

– reception of solid waste from medical institutions with violation to the rules of collection, storage and waste disposal of medical and preventive treatment institutions;

– reception of recyclable materials directly from refuse collection lorry;

– sorting and selective collection of waste with violation to health and sanitation requirements.

For a settlement the environmental situation can be classified in ascending order of ecological trouble in the following way [12]:

– relatively satisfactory;

– tense;

– critical;

– crisis (or zone of emergency ecological situation);

– catastrophic (or the zone of ecological disaster).

The result of these random events can be acquiring by the settlement the characteristics of the territory of a state of extreme distress [13]. More research is needed to be conducted to determine the criteria of the environmental quality, classifying the territory as tense and critical.

Structural and logical model of implementation of vertex outcomes in the system of "object of waste disposal – protection – locality" is represented in Fig. 1.

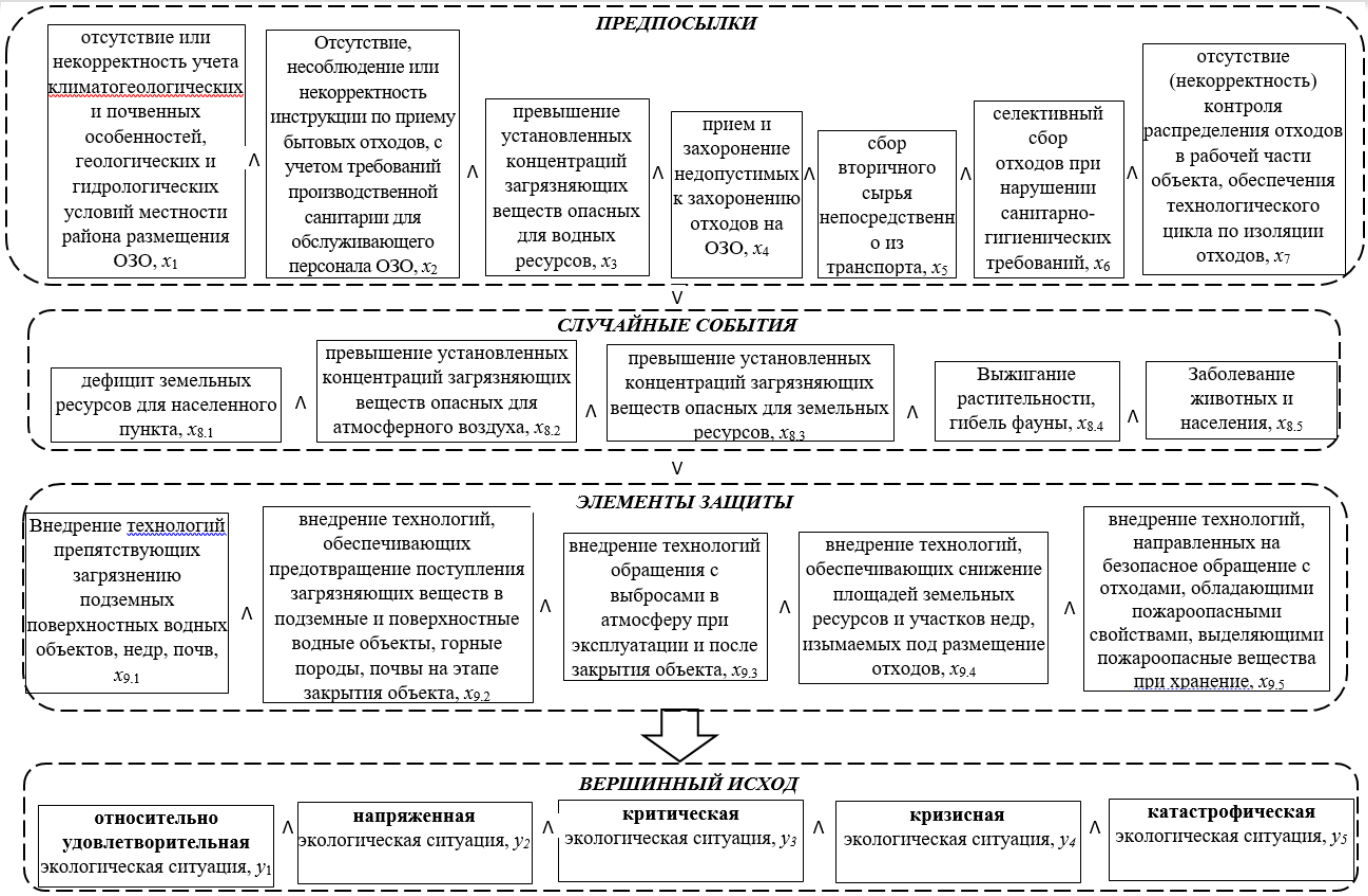

Рис. 1. Структурно-логическая модель вершинных исходов в системе "объект захоронения отходов – защита – населенный пункт"

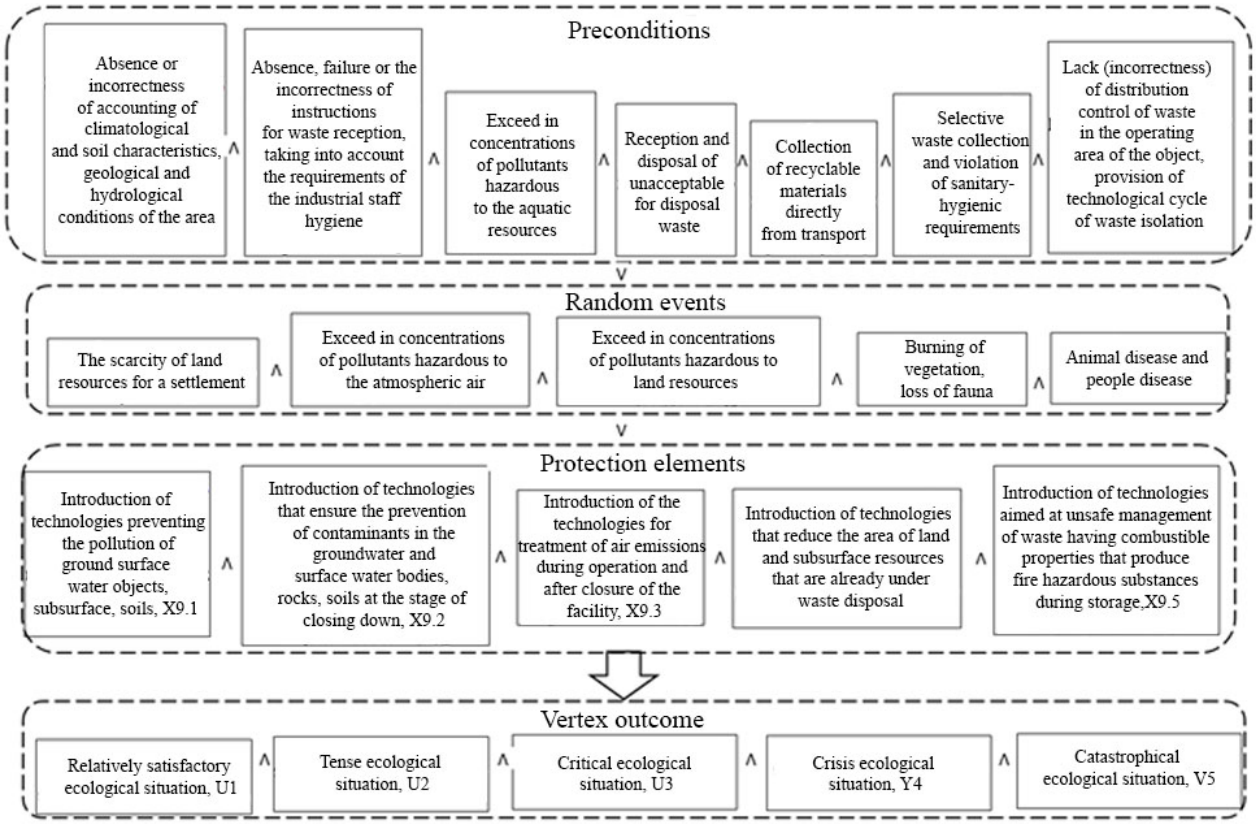

Fig. 1. Structural and logical model of vertex outcomes in the system of "object of waste disposal – protection – locality"

Экспериментальная часть.

На основании анализа лабораторных исследований, проведенных в рамках производственного контроля и мониторинга состояния окружающей среды объекта размещения отходов ООО "Южный город" [14], было выявлено, что при эксплуатации объекта размещения отходов существуют предпосылки возникновения следующих случайных событий, реализация которых с некоторой долей вероятности может привести к следующим вершинным исходам, далее соответственно обозначенных как ВИ1; ВИ2; ВИ3: относительно удовлетворительная экологическая ситуация (ОУЭС); чрезвычайная экологическая ситуация (ЧЭС); экологическое бедствие (ЭБ) [13].

Для оценки степени безопасности эксплуатации объекта размещения отходов, а также для разработки и обоснования применяемой защиты авторами решалась задача расчёта возможностной меры реализации каждого из вершинных исходов.

При анализе было принято, что структурно-логическая функция наступления каждого из вершинных исходов (ВИ1, ВИ2 и ВИ3) обусловлена полным множеством описываемых предпосылок $\{x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6, x_7, x_{8,i}, x_{9,i}\}$, представлена на рис. 1 и имеет следующий вид:

$$y = x_1 \cap x_2 \cap x_3 \cap x_4 \cap x_5 \cap x_6 \cap x_7 \cup (x_{8.1} \cap x_{8.2} \cap x_{8.3} \cap x_{8.4} \cap x_{8.5}) \cup (x_{9.1} \cap x_{9.2} \cap x_{9.3} \cap x_{9.4}) \quad (1)$$

В соответствии с протоколами испытаний и измерений показателей качества окружающей среды, в районе размещения ООО "Южный город" наиболее подвержены негативному воздействию оказываются грунтовые воды, в которых наблюдается превышение нитратов, что является индикатором экологической ситуации [13,14]. Как и многие другие химические вещества, нитраты оказывают на биоценозы двоякое воздействие: с одной стороны — это обязательный компонент питания растений. С другой стороны, при существенном избытке нитратов, в том числе в грунтовых водах,

Experimental part.

Based on the analysis of laboratory studies conducted in the framework of production control and monitoring of the state of the environment of "South city" disposal facility [14], it was found that in the operation of the disposal facility there are preconditions for the following random events, which with some probability may lead to the next vertex outcomes, which are respectively denoted as VO1; VO2; VO3: relatively satisfactory ecological situation (RSES); environmental emergencies (EE); environmental disaster (ED) [13].

To assess the degree of safety of operation of the disposal facility and to develop and justify the protection the authors have addressed the problem of computing of probabilistic measure of implementation of each of the vertex outcomes.

In the analysis it was decided that the structural-logical function of occurrence of each vertex outcome (VO1, VO2, and VO3) is due to the complete set of the described preconditions $\{x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6, x_7, x_{8,i}, x_{9,i}\}$, represented in Fig. 1 and has the following form:

$$y = x_1 \cap x_2 \cap x_3 \cap x_4 \cap x_5 \cap x_6 \cap x_7 \cup (x_{8.1} \cap x_{8.2} \cap x_{8.3} \cap x_{8.4} \cap x_{8.5}) \cup (x_{9.1} \cap x_{9.2} \cap x_{9.3} \cap x_{9.4}) \quad (1)$$

In accordance with the protocols of tests and measurements of indicators of environmental quality in the area of "South city" the most vulnerable to the negative impact are ground waters which have nitrate exceeding, which is an indicator of the ecological situation [13, 14]. Like many other chemicals, nitrates have a twofold impact on biocenosi: on the one hand, they is necessary elements of plant nutrition. On the other hand, with a substantial excess of nitrate, including the groundwater, there is a danger to animals and humans. According to the effect on

возникает опасность для животных и человека. По влиянию на здоровье человека различают: первичную токсичность нитрат-иона; вторичную, связанную с образованием нитрит-иона и третичную, обусловленную образованием из нитритов и аминов нитрозаминов. Сами нитраты относятся к умерено опасным веществам (III класс опасности), но под действием микрофлоры кишечника идет восстановление их в нитриты, которые во много раз токсичнее. Нитриты относятся к высокоопасным веществам – II класс опасности [17].

Расчет возможностной меры отравления вредными загрязняющими веществами производился следующим образом.

Параметрическая модель условий превышения параметров воздействия над параметрами восприимчивости для трех возможных исходов на примере действия нитратов в грунтовых водах представлена на рис. 2.

human health, we can distinguish the primary toxicity of nitrate ion; secondary toxicity connected with the formation of the nitrite-ion, and tertiary toxicity, due to the formation of nitrites, amines and nitrosamines. The nitrates themselves belong to moderately hazardous substances (III hazard class), but under the influence of the intestinal microflora there is the restoration of them to nitrites, which are many times more toxic. Nitrites are highly hazardous chemicals – II hazard class [17].

The calculation of probabilistic measures of poisoning of harmful pollutants is carried out in the following way.

The parametric model of excess terms of parameters of influence over the receptivity parameters for the three possible outcomes on the example of nitrates action in the groundwater is shown in Fig. 2.

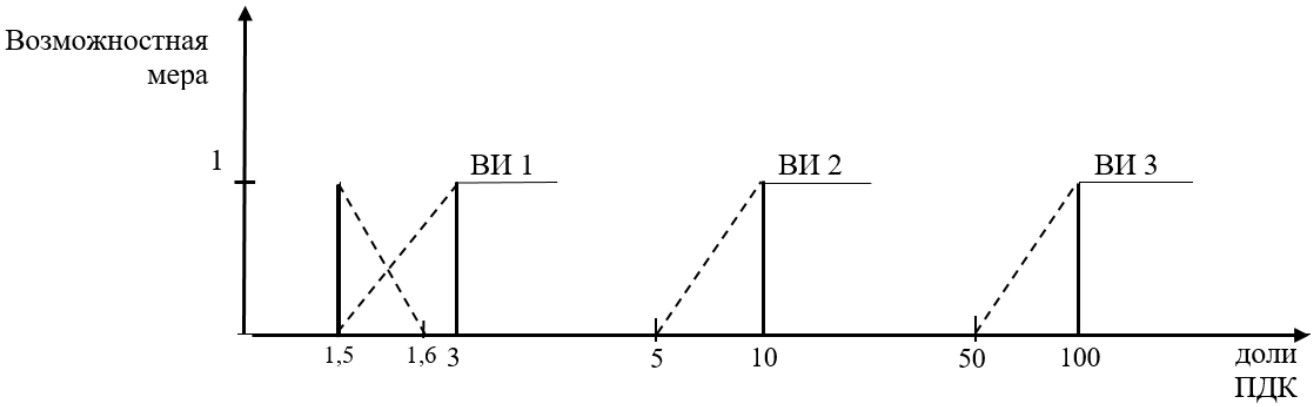

Рис. 2. Иллюстрация трёх вершинных исходов на примере действия нитратов в грунтовых водах

Fig. 2. Illustration of three vertex outcomes on the example of nitrates action in the groundwater

Алгоритм подготовки и получения исходных данных для расчета возможностных мер возникновения трех вершинных исходов на примере действия нитратов в грунтовых водах содержит следующие этапы.

1) Выбор значений параметра восприимчивости, а также погрешностей его представления для следующих вершинных исходов.

Вершинный исход ВИ1 — относительно

The algorithm for preparation and obtaining source data for the calculation of probabilistic measures of occurrence of three vertex outcomes on the example of nitrates action in the groundwater includes the following steps.

1) The choice of susceptibility parameter values, as well as errors in its representation to the next vertex outcomes.

The vertex outcome VO1 is a relatively

удовлетворительная экологическая ситуация. Восприимчивость к ОУЭС выражается через значение долей ПДК — n_i = 1(ПДК). Абсолютная погрешность представления параметра восприимчивости:

$$\Delta_i = \delta \times n_i = 0{,}5 \times 1 = 0{,}5 \text{ (ПДК)}.$$

Вершинный исход ВИ2 — чрезвычайная экологическая ситуация. Восприимчивость к ЧЭС выражается через определенное пороговое значение долей ПДК — n_i = 10(ПДК). Абсолютная погрешность представления параметра восприимчивости [13]:

$$\Delta_i = \delta \times n_i = 0{,}5 \times 10 = 5 \text{ (ПДК)}.$$

Вершинный исход ВИ3 — экологическое бедствие. Восприимчивость к ЭБ выражается через определенное пороговое значение долей ПДК n_i = 100(ПДК); абсолютная погрешность представления параметра восприимчивости к ЭБ [13]:

$$\Delta_i = \delta \times n_i = 0{,}5 \times 100 = 50 \text{ (ПДК)}.$$

2) Измерение значений параметра воздействия *s* принято на основании [14]: $n_{изм}$ = 8,37 (ПДК) и абсолютной погрешности Δ_S его представления, значение которой соответствует погрешности способа, которым проводились испытания грунтовых вод [15]: $\Delta_S = \delta \times n_i = 0{,}2 \times 8{,}37 = 1{,}67$ (мг/м^3).

3) Расчет приведенного параметрического запаса безопасности: $z\bar{b}_i$ = 0,42.

4) Расчет возможностной меры ОУЭС: $\pi_i = 1 - z\bar{b}_i$ = 0,58.

Аналогично были получены исходные данные и результаты расчета для других вершинных исходов от действия оксида углерода, формальдегида и ацетальдегида, которые сведены в таблицу 2.

satisfactory ecological situation. Susceptibility to RSES is expressed through the value of the parts of MPC — n_i = 1 (MPC). The absolute error of representation of the susceptibility parameter:

$$\Delta_i = \delta \times n_i = 0{,}5 \times 1 = 0.5 \text{ (MPC)}.$$

The vertex outcome VO2 is an extraordinary environmental situation. Susceptibility to the EE is expressed through a certain threshold value of parts of MPC — n_i = 10 (MPC). The absolute error of representation of the susceptibility parameter [13]:

$$\Delta_i = \delta \times n_i = 0{,}5 \times 10 = 5 \text{ (MPC)}.$$

The vertex outcome VO3 — environmental disaster. Susceptibility to ED is expressed through a certain threshold value of parts of MPC n_i = 100 (MPC); the absolute error of representation of the susceptibility parameter to ED [13]:

$$\Delta_i = \delta \times n_i = 0{,}5 \times 100 = 50 \text{ (MPC)}.$$

2) Measurement of values of the exposure parameter s are usually conducted on the basis of [14]: $n_{изм}$ = of 8,37 (MPC) and the absolute error Δ_S of its representation, the value of which corresponds to the error of the way in which groundwater tests were conducted [15]: $\Delta_S = \delta \times n_i = 0{,}2 \times 8{,}37 = 1.67$ (mg/m^3).

3) The calculation of the parametric safety margin: $z\bar{b}_i$ = 0,42

4) The calculation of RSES probabilistic measures: $\pi_i = 1 - z\bar{b}_i$ = 0,8.

Similarly, we obtained the raw data and the calculation results for the other vertex outcomes from the action of carbon monoxide, formaldehyde, and acetaldehyde, which are summarized in Table 2.

Таблица 1
Table 2

Расчетные значения возможностной меры трёх вершинных исходов при эмиссии загрязняющих веществ в окружающую среду
The calculated values of the probabilistic measures of three vertex outcomes in the emission of pollutants into the environment.

	Негативный фактор, концентрация *n*, [доли ПДК] *Negative factor, concentration n,*	Вершинный исход (*i*=1,2,3) *Vertex outcome (i=1,2,3)*	Нижняя граница восприимчивости *Lower susceptibility threshold* $\underline{r}_1 - \Delta^i_R$	Верхняя граница воздействия *Upper impact limit* $\overline{s}_1 + \Delta^i_S$	Запас безопасности *Safety margin* $\underline{zb}_i$	Возможностная мера *Probabilistic measure* π_i
Атмосферный воздух / *Natural air*	Оксид углерода *Carbon monoxide*	ОУЭС / .RSES, *i*=1	1-0,5	1,02+0,51	0,49	0,51
		ЧЭС / .EE, *i*=4	8-4		-	-
		ЭБ / .ED, *i*=5	12-6		-	-
	Аммиак *Ammonia*	ОУЭС / .RSES, *i*=1	1-0,5	1+0,5	0,5	0,5
		ЧЭС / .EE, *i*=4	8-4		-	-
		ЭБ / .ED, *i*=5	12-6		-	-
	Сероводород *Hydrogen sulfide*	ОУЭС / .RSES, *i*=1	1-0,5	1+0,5	0,5	0,5
		ЧЭС / .EE, *i*=4	3-1.5		-	-
		ЭБ / .ED, *i*=5	5-2,5		-	-
	Бензол *Benzene*	ОУЭС / .RSES, *i*=1	1-0,5	1+0,5	0,5	0,5
		ЧЭС / .EE, *i*=4	3-1,5		-	-
		ЭБ / .ED, *i*=5	5-2,5		-	-
Грунтовые воды /*Ground water*	Нитраты *Nitrates*	ОУЭС / .RSES, *i*=1	3-1,5	8,37+1,67	0,42	0,58
		ЧЭС / .EE, *i*=4	10-5		-	-
		ЭБ / .ED, *i*=5	100-50		-	-
Земельные ресурсы / *Natural resources*	Цинк *Zinc* (Показатель химического загрязнения почвы, Z_C *Indicator of chemical contamination of soil,* Z_C)	ОУЭС / .RSES, *i*=1	16-8	8,68+4,34	0,94	0,06
	Свинец *Lead*					
	Ртуть *Mercuru*	ЧЭС / .EE, *i*=4	32-16		-	-
	Свинец *Lead*					
	Медь *Copper*	ЭБ / .ED, *i*=5	128-64		-	-
	Никель *Nikel*					
	Мышьяк *Arsenic*					
	Содержание яиц гельминтов *Content of helminth eggs*	ОУЭС / .RSES, *i*=1	отсутствие *Absence*	отсутствие *Absence*	0,5	0,5
		ЧЭС / .EE, *i*=4	10-5		-	-
		ЭБ / .ED, *i*=5	100-50		-	-
	Число патогенных микроорганизмов *Number of pathogenic microorganisms*	ОУЭС / .RSES, *i*=1	отсутствие *Absence*	отсутствие *Absence*	0,5	0,5
		ЧЭС / .EE, *i*=4	10^5-50000		-	-
		ЭБ / .ED, *i*=5	10^6-500000		-	-

Анализ полученных результатов (см. строку «Нитраты») показывает, что возможностная мера реализации вершинного исхода — относительно удовлетворительная экологическая ситуация (ОУЭС) равна 0,58. Фактически это означает, что более чем половина населения находится на границе ухудшения самочувствия от негативного воздействия нитратов.

Ввиду того, что технологический процесс захоронения отходов на полигоне ООО «Южный город» предполагает сбор и удаление фильтрата через систему перфорированных трубок с последующим вывозом специализированными организациями для его обезвреживания, а тело полигона герметично и изолировано от контакта с компонентами окружающей среды, есть несколько вариантов возникновения превышения концентрации нитратов в процессе эксплуатации объекта, в зависимости от которых необходимо выбрать защитные мероприятия. Схема защитных мероприятий представлена на рис. 2.

The analysis of the obtained results (see the line "Nitrates") shows that the probabilistic measure of vertex outcome is a relatively satisfactory ecological situation (RSES) and is equal to 0.58. Practically, this means that more than half of the population is on the border of feeling unwell from the negative effects of nitrates.

Due to the fact that the technological process of waste disposal at "South city" landfill involves the collection and removal of filtrate through the system of perforated tubes with the following removal of it by the specialized organizations for its neutralization, and the body of the landfill is leak-proof and isolated from the contact with components of the environment, there are several variants of occurrence of the excess concentrations of nitrates in the process of operation of the facility, depending on which one need to choose protective measures. The scheme of protective measures is shown in Fig. 2.

Рис. 2. Схема определение защитных мероприятий для снижения концентрации нитратов в грунтовых водах

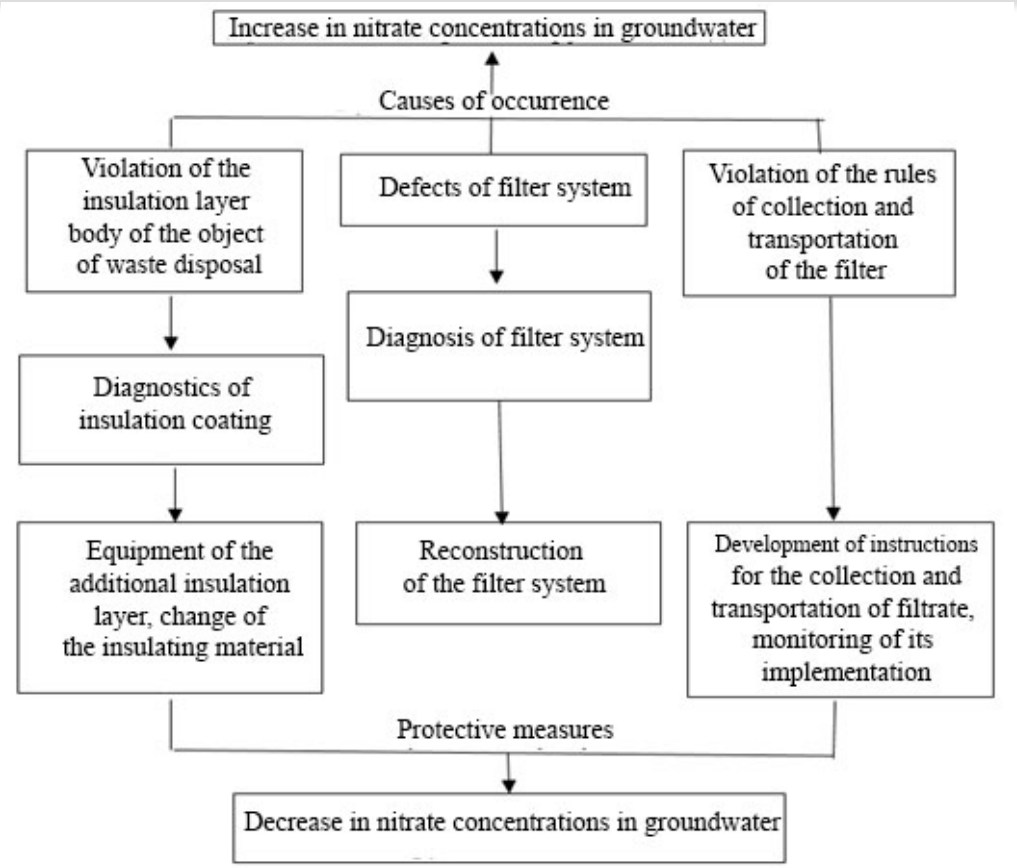

Fig. 2. The scheme of protective measures to reduce nitrate concentrations in the groundwater

Так как при диагностировании фильтратотводящей системы и изоляционного слоя полигона ООО «Южный город» не выявили значимых дефектов и нарушений, авторами был разработан проект инструкции сбора и транспортирования фильтрата. В результате исполнения требований указанной инструкции, при условии корректности проведенной диагностики, расчетное значение возможностной меры наступления удовлетворительной экологической ситуации составит не менее 0,91.

Выводы.

В результате исследований была проведена адаптация логико-возможностного метода параметрического моделирования в уникальной системе «объект захоронения отходов-защита-населенный пункт» для оценки экологического риска эксплуатации опасных элементов с установлением мер управления и снижения опасности. Указанный метод может применятся в условиях ограниченности и малой изученности исходных данных в любой

Since the diagnosis of filtrate removing system and the insulating layer of "South city" landfill has not identified any significant flaws and inconsistencies, the authors have developed the draft guidelines for filtrate collection and transportation. As a result of instruction requirements fulfillment provided that the diagnosis was correct, the estimated value of the probabilistic measures of the onset of a satisfactory ecological situation will be at least 0.91.

Conclusion.

In the investigation there has carried out the adaptation of the logical-probabilistic method of parametric modeling in the unique system of "object of waste disposal-protection-locality" for ecological risk assessment of the operation of hazardous elements in order to establish management measures and reduce the risk. This method can be applied in the context of limited and poor knowledge of source data in

действительной системе, состоящей из элементов — объект захоронения отходов, населенный пункт. Результаты проведенной апробации адаптированного логико-возможностного метода параметрического моделирования в рамках системы «полигон твердых бытовых отходов ООО «Южный город» – участок селитебной территории» могут быть использованы при выявлении идентичных факторов повышенной опасности. Это позволит значительно упростить определение и снижение экологического риска рассматриваемой системы.

any system, consisting of the object of waste disposal and the locality. The results of the testing of the adapted logical-probabilistic method of parametric modeling in the framework of "solid waste landfill "South city" – part of the residential district" can be used for the detection of identical factors of high risk. This will greatly simplify identifying and reducing of environmental risk of the system.

Библиографический список.

1. Экологический вестник Дона. О состоянии окружающей среды и природных ресурсов Ростовской области в 2015 году [Электронный ресурс] / под ред. В. Н. Василенко, Г. А. Урбана. — Ростов-на-Дону. — 2016. — 369 с. — Режим доступа : http://ecodon.dspl.ru/docs/ЭкоВестник%20Дона.pdf (дата обращения 13.02.2017).

2. Обращение с отходами [Электронный ресурс] / Официальный сайт Министерства природных ресурсов и экологии Ростовской области/состояние окружающей среды — Режим доступа : http://минприродыро.рф/state-of-the-environment/otkhody/ (дата обращения: 20.02.2017).

3. Рябинин, И. А. Логико-вероятностные методы исследования надежности структурно-сложных систем / И. А. Рябинин, Г. М. Черкесов. — Москва : Радио и связь, 1981. — 263 с.

4. Есипов, Ю. В. Мониторинг и оценка риска систем «защита–объект–среда» / Ю. В. Есипов, Ф. А. Самсонов, А. И. Черемисин. — 3 изд. — Москва : Изд. ЛКИ-УРСС, 2013. — 138

References.

1. Ekologicheskiy vestnik Dona. O sostoyanii okruzhayushchey sredy i prirodnykh resursov Rostovskoy oblasti v 2015 godu. Pod red. V. N. Vasilenko, G. A. Urbana. [Don ecological bulletin. On the state of the environment and natural resources of the Rostov region in 2015. Ed. by V.N. Vasilenko, G.A. Urban.] Rostov-on-Don, 2016, 369 p. Available at: http://ecodon.dspl.ru/docs/ЭкоВестник%20Дона.pdf (accessed 13.02.2017) (in Russian).

2. Obrashchenie s otkhodami. Ofitsial'ny sayt Ministerstva prirodnykh resursov i ekologii Rostovskoy oblasti. [Waste management. Official site of The Ministry of natural resources and environment of the Rostov region.] Available at: http://минприродыро.рф/state-of-the-environment/otkhody/ (accessed: 20.02.2017) (in Russian).

3. Ryabinin, I.A., Cherkesov, G.M. Logiko-veroyatnostnye metody issledovaniya nadezhnosti strukturno-slozhnykh sistem. [Logical and probabilistic methods of research of reliability of structurally complex systems.] Moscow, Radio i svyaz', 1981, 263 p. (in Russian).

4. Esipov, Y.V., Samsonov, F.A., Cheremisin, A.I. Monitoring i otsenka riska sistem "zashchita – ob'ekt – sreda". [Monitoring and risk assessment of systems "protection–object–environment".] Moscow, Izd. LKI-URSS, 2013, 138 p. (in Russian).

5. Esipov, Y.V., Lapsar, A.P. Razrabotka metoda sistemnogo analiza potentsial'noy

с.

5. Есипов, Ю. В. Разработка метода системного анализа потенциальной опасности комплекса «технический объект–нерегламентированные факторы окружающей среды» / Ю. В. Есипов, А. П. Лапсарь // Надежность и контроль качества. — 1997. — № 11. — С. 17–21.

6. Есипов, Ю. В. Концепция возможностной оценки риска техногенных систем / Ю. В. Есипов // Автоматика и Телемеханика. — 2003. — № 7. — С. 5–12.

7. Есипов, Ю. В. Моделирование опасностей и установление меры определенности происшествия в системе / Ю. В. Есипов // Проблемы машиностроения и надежности машин. — 2003. — № 3. — С. 112–117.

8. ГОСТ Р ИСО 14001–2016. Системы экологического менеджмента. Требования и руководство к применению / Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии. — Москва : Стандартинформ, 2016. — 39 с.

9. ИТС 17–2016. Размещение отходов производства и потребления / Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии. — Москва : Бюро НДТ, 2016. — 181 с.

10. О санитарно-эпидемиологическом благополучии населения: федер. закон: [утв. Министерством здравоохранения Российской Федерации 30 мая 2001 г.] / Доступ из справочно-правовой системы «Консультант Плюс». — 2016. — 25с.

11. Инструкции по проектированию, opasnosti kompleksa "tekhnicheskiy ob’ekt – nereglamentirovannye faktory okruzhayushchey sredy". [Development of a method of system analysis of potential hazards of the complex "technical object–ad hoc environmental factors".] Nadezhnost’ i kontrol’ kachestva, 1997, no. 11, pp. 17-21 (in Russian).

6. Esipov, Y.V. Kontseptsiya vozmozhnostnoy otsenku riska tekhnogennykh system. [Concept of the probabilistic risk assessment of technological systems.] Avtomatika i Telemekhanika, 2003, no. 7, pp. 5-12 (in Russian).

7. Esipov, Y.V. Modelirovanie opasnostey i ustanovlenie mery opredelennosti proisshestviya v sisteme. [Modeling of risks and the establishment of measures of certainty of accidents occurrence in the system.] Problemy mashinostroeniya i nadezhnosti mashin, 2003, no. 3, pp. 112-117 (in Russian).

8. GOST R ISO 14001-2016. Sistemy ekologicheskogo medezhmena. Trebovaniya i rukovodstvo k primeneniyu. Federal’noe agenstvo po tekhnicheskomu regulirovaniyu i metrologii. [GOST R ISO 14001-2016. Environmental management system. Requirements with guidance for use. Federal agency for technical regulation and metrology.] Moscow, Standartinform, 2016, 39 p. (in Russian).

9. ITS 17-2016. Razmeshchenie otkhodov proizvodstva i potrebleniya. Federal’noe agenstvo po tekhnicheskomu regulirovaniyu i metrologii. [ITS 17-2016. Disposal of waste production and consumption. Federal agency for technical regulation and metrology.] Moscow, Byuro NDT, 2016, 181 p. (in Russian).

10. O sanitarno-epidemologicheskom blagopoluchii naseleniya: feder. zakon. [utv. Ministerstvom zdravookhraneniya Rossiyskoy Federatsii 30 Maya 2001. Dostup iz spravochno-pravovoy sistemy “Konsul’tant Plyus”. [On the sanitary-epidemiological welfare of the population. Feder. law: [appr. by The Ministry of health of the Russian Federation on May 30, 2001.] Access from reference legal system "Consultant Plus".] 2016, 25 p. (in Russian).

11. Instruktsii po proektirovaniyu, ekspluatatsii i rekul’tivatsii poligonov dlya tverdykh otkhodov: Instruktsiya. [utv.

эксплуатации и рекультивации полигонов для твердых коммунальных отходов : Инструкция [утв. Министерством строительства Российской Федерации 05 ноября 1996 г.] // Доступ из справочно-правовой системы «Консультант Плюс». — 2016. — 39с.

12. Об охране окружающей среды: федер. закон [утв. Министерством природных ресурсов и экологии Российской Федерации 20 деквбря 2001 г.] // Доступ из справочно-правовой системы «Консультант Плюс». — 2016. — 48 с.

13. Критерии оценки экологической обстановки территорий для выявления зон чрезвычайной экологической ситуации и зон экологического бедствия: Постановление [утв. Министерством природных ресурсов и экологии Российской Федерации 30 ноября 1992 г.] // Доступ из справочно-правовой системы «Консультант Плюс». — 2016. — 59 с.

14. Отчет о результатах мониторинга на территории объекта размещения отходов ООО "Южный Город" и в пределах его воздействия на окружающую среду / под ред. Д.М. Кочкин. — Ростов-на-Дону : ООО «Южный город», 2016. — 38с.

15. Количественный химический анализ вод. Методика выполнения измерений массовых концентраций хлорид-ионов, нитрит-ионов, сульфат-ионов, нитрат-ионов, фторид-ионов и фосфат-ионов в пробах природных, питьевых и очищенных сточных вод с применением системы капиллярного электрофореза "Капель": ПНД Ф 14.1:2:4.157–99.

Ministerstvom stroitel’stva Rossiyskoy Federattsii 05 Noyabrya 1996. Dostup iz spravochno-pravovoy sistemy “Konsul’tant Plyus”.] [Instructions for designing, operating and reclaiming landfills for municipal solid waste: instruction. [appr. by The Ministry of construction of the Russian Federation on November 05, 1996.] Access from reference legal system "Consultant Plus".] 2016, 39p. (in Russian).

12. Ob okhrane okruzhayushchey sredy. Feder. zakon. [utv. Ministerstvom prirodnykh resursov i ekologii Rossiyskoy Federatsii 20 dekabrya 2001. Dostup iz spravochno-pravovoy sistemy “Konsul’tant Plyus”.] [On the environmental protection. Feder. law [app. by The Ministry of natural resources and ecology of the Russian Federation on December 20, 2001.] Access from reference legal system "Consultant Plus".] 2016, 48 p. (in Russian).

13. Kriterii otsenki ekologicheskoy obstanovki territoriy dlya vyyavleniya zon chrezvychaynoy ekologicheskoy situatsii i zon ekologicheskogo bedstviya: Postanovlenie. [utv. Ministerstvom prirodnykh resursov i ekologii Rossiyskoy Federatsii 30 noyabrya 1992. Dostup iz spravochno-pravovoy sistemy “Konsul’tant Plyus”.] [Criteria of evaluation of ecological situation of territories for revealing zones of extraordinary ecological situation and zones of ecological disasters: Resolution. [app. by The Ministry of natural resources and ecology of the Russian Federation on November 30, 1992.] Access from reference legal system "Consultant Plus".] 2016, 59 p. (in Russian).

14. Otchet o rezul’tatakh monitoringa na territorii ob’ekta razmeshcheniya otkhodov OOO “Yuzhny Gorod” i v predelakh ego vozdeystviya na okruzhayushchyyu sredu. Pod red. D.M. Kochkin. [Report on the results of monitoring on the territory of waste disposal facility "South City" and its impact on the environment. ed. by D. M. Kochkin.] Rostov-on-Don, "Yuzhny gorod", 2016, 38 p. (in Russian).

15. Kolichestvenny khimicheskiy analiz vod. Metoduka vypolneniya izmereniy massovykh kontsentratsiy khlorid-ionov, nitrit-ionov, sul’fat-ionov, nitrat-ionov, ftorid-ionov i fosfat-ionov v probakh prirodnykh, pit’evykh i ochishchennykh stochnykh vod s

Федеральный центр анализа и оценки техногенного воздействия. — Москва : ЗАО «Роса», 2012. —12 с.

16. Есипов, Ю. В. Методы расчета показателей безопасности и риска / Ю. В. Есипов, Л. Е. Пустовая. А. И. Черемисин. — Ростов-на-Дону : Изд-во ДГТУ, 2016. — 84 с.

17. Новых, Л. Л. Влияние положения родников в ландшафтах на содержание нитратов в их водах / Л. Л. Новых, Ю. В. Юдина, Г. А. Орехова // Научные ведомости Белгородского государственного университета. Серия : Естественные науки. — 2012. — Т.18, № 3 (122) — С. 19–28.

primeneniem sistemy kapillyarnogo elektroforeza “Kapel’”. PND F 14.1:2:4.157–99. Federal’ny tsentr analiza i otsenki tekhnogennogo vozdeystviya. [Quantitative chemical analysis of waters. Measurements technique of mass concentration of chloride-ions, nitrite-ions, sulfate-ions, nitrate-ions, fluoride ions and phosphate ions in samples of natural, potable and treated wastewater using the system of capillary electrophoresis "Kapel". PND F 14.1:2:4.157–99. Federal center of analysis and assessment of anthropogenic impact.] Moscow, ZAO "Rosa", 2012, 12 p. (in Russian).

16. Esipov, Y.V., Pustovaya, L.E., Cheremisin, A.I. Metody rascheta pokazateley bezopasnosti i riska. [Methods of calculation of safety and risk indicators.] Rostov-on-Don, Izd. DSTU, 2016, 84 p. (in Russian).

17. Novykh, L.L., Yudina, Y.V., Orekhova, G.A. Vliyanie polozheniya rodnikov v landshaftakh na soderzhanie nitratov v ikh vodakh. [Impact of springs location on the landscape on the content of nitrates in their waters.] Nauchnye vedomosti Belgorodskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Estestvennye nauki, 2012, vol. 18, no. 3 (122), pp. 19-28 (in Russian).

Поступила в редакцию 28.04.2017
Сдана в редакцию 28.04.2017
Запланирована в номер 05.06.2017

Received 28.04.2017
Submitted 28.04.2017
Scheduled in the issue 05.05.2017

Хорошун Элина Григорьевна,
Аспирант Донского государственного технического университета,
(РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1)
horoshun.rpn-eko@bk.ru

Есипов Юрий Вениаминович,
Доктор технических наук Донского государственного технического университета,
(РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1)
yu-yesipov5@yandex.ru

Khoroshun Elina Grigorevna,
Post graduate student of Don State Technical University (Gagarin sq., 1, Rostov-on-Don, Russian Federation)
horoshun.rpn-eko@bk.ru

Esipov Yuriy Veniaminovich,
Doctor of techn. sciences *of Don State Technical University (Gagarin sq., 1, Rostov-on-Don, Russian Federation)*
yu-yesipov5@yandex.ru